



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Modelo de evaluación económica y financiera de compra de mineral a terceros de una empresa minera por medio de valoración de proyectos bajo incertidumbre

Daniel Andrés Vélez Sánchez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales
Medellín, Colombia

2023

Modelo de evaluación económica y financiera de compra de mineral a terceros de una empresa minera por medio de valoración de proyectos bajo incertidumbre

Daniel Andrés Vélez Sánchez

Trabajo final de maestría presentado como requisito para optar al título de magíster en
Ingeniería – Recursos minerales

Director:

PhD. Giovanni Franco Sepúlveda

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales
Medellín, Colombia

2023

Resumen

Modelo de evaluación económica y financiera de compra de mineral a terceros de una empresa minera por medio de valoración de proyectos bajo incertidumbre

Los depósitos auríferos son fijos en ubicación, calidad y cantidad, por ello la cadena que comprende la extracción, beneficio y comercialización se enfrenta no solo a los problemas de abastecimiento y calidad sino a las cantidades finales de mineral comercial, por lo que las empresas emprenden opciones de negocio a través de la flexibilidad captando mineral a pequeños proveedores que por su método selectivo de minado no suministran amplias cantidades (toneladas) pero si concentraciones atractivas (leyes) para mejorar la calidad del mineral alimentado a planta de beneficio. El sector de la pequeña minería no posee metodologías de extracción ni beneficio eficientes que permitan recuperar la mayor cantidad de mineral comercial posible dado los escasos recursos financieros, ausencia de acompañamiento técnico y la no implementación de sistemas de gestión, de esta forma, la venta directa a empresas más grandes se convierte en un negocio interesante para ambas partes y una manera de apoyo al pequeño productor formal y las herramientas implementadas por los entes gubernamentales para el control de la comercialización de oro del país. El valor financiero es la medida de la viabilidad que posee una operación o proyecto para generar beneficios a partir de unos costos e inversiones. En minería, el valor financiero puede ser cuantificado a través del valor presente neto (VPN), el cual, es comúnmente calculado a través de modelos determinísticos que son estáticos y no permiten observar las verdaderas opciones de flexibilidad y por lo tanto no hay un acierto en la medición de los riesgos y las incertidumbres. Por medio de la presente entrega, se propone un modelo de evaluación financiera empleando la simulación Montecarlo como una alternativa de carácter estocástico para contemplar las variables endógenas y exógenas que fluctúan en el tiempo y de esta forma obtener un VPN y márgenes de rentabilidad ante diferentes tipos de escenarios. Mediante el empleo de los datos de una empresa minera aurífera dedicada a la extracción, compra de mineral, beneficio y comercialización se llevó a cabo la validación del modelo y su aplicabilidad. Se observó que el VPN del modelo estocástico de alta certidumbre fue superior al modelo estocástico de alta certidumbre en \$129.691.483.995 COP, al igual que el margen de rentabilidad con una diferencia porcentual de 1,19%. Además, al evaluar el negocio para compra de mineral, empleando un pagable de onza para el proveedor entre 62% y 65% proporcionó

una rentabilidad de 23,76%, generando un gran atractivo no solo para la empresa sino la posibilidad comprar a pequeños proveedores y fomentar contratos a largo plazo. También, el modelo mostró que el VPN posee una alta sensibilidad en primer lugar por el tenor del mineral propio, después por el precio del oro y en tercer puesto por la Tasa Representativa del Mercado (TRM), además, a los índices de recuperación metalúrgica, mostrando así las ventajas de emplear este tipo de modelos de evaluación para observar y mitigar los riesgos operativos y no operativos.

Palabras clave: pequeña minería, ley, Valor Presente Neto, simulación Montecarlo, índices metalúrgicos.

Abstract

Economic and financial evaluation model of mineral purchase from suppliers of a mining company through project valuation under uncertainty

Gold deposits are fixed in location, quality and quantity, therefore the chain that includes extraction, benefit and commercialization faces not only supply and quality problems but also the final quantities of commercial mineral, which is why companies undertake business options through flexibility, capturing ore from small suppliers that, due to their selective mining method, do not supply large quantities (tons) but do provide attractive concentrations (grades) to improve the quality of the ore fed to the beneficiation plant. The small-scale mining sector does not have efficient extraction or benefit methodologies that allow the recovery of the greatest amount of commercial mineral possible given the scarce financial resources, the absence of technical support and the non-implementation of management systems, in this way, direct sales larger companies becomes an interesting business for both parties and a way of supporting the small formal producer and the tools implemented by government entities to control the commercialization of gold in the country. The financial value is the measure of the viability of an operation or project to generate benefits from some costs and investments. In mining, financial value can be quantified through the net present value (NPV), which is commonly calculated through deterministic models that are static and do not allow us to observe the true flexibility options. and therefore there is no success in the measurement of risks and uncertainties. Through this delivery, a financial evaluation model is proposed using the Monte Carlo simulation as a stochastic alternative to contemplate the endogenous and exogenous variables that fluctuate over time and thus obtain a NPV and profit margins at different rates. of scenarios. Through the use of data from a gold mining company dedicated to the extraction, purchase of mineral, benefit and commercialization, the validation of the model and its applicability was carried out. It was observed that the NPV of the stochastic model of high certainty was

higher than the stochastic model of low certainty by \$129.691.483.995 COP, as was the profit margin with a percentage difference of 1,19%. In addition, when evaluating the business for the purchase of ore, using an ounce payable for the supplier between 62% and 65% provided a profitability of 23,76%, generating great attraction not only for the company but also for the possibility of buying from small suppliers. and encourage long-term contracts. Also, the model showed that the NPV has a high sensitivity firstly by grade of the own mineral, then by the price of gold and thirdly by the Exchange Rate (ER), in addition, to metallurgical recovery rates, thus showing the advantages of using this type of evaluation model to observe and mitigate operational and non-operational risks.

Key words: small-scale mining, grade, Net Present Value, Montecarlo Simulation, Metallurgical indexes.

"Lo intentaste. Fracasaste. Da igual. Prueba otra vez. Fracasa otra vez. ¡Fracasa mejor!"
Samuel Beckett, 1983

Agradecimientos

A Dios sobre todas las cosas, este trabajo es fruto de todas sus bendiciones.

A mis viejas: Eliana y Ofelia, por su amor, dedicación, entrega, sacrificio y paciencia. A través de su apoyo incondicional y formación he podido alcanzar muchos logros, este es uno de ellos.

A mis hermanos: Manuel y Luciana. Manuel, siempre ha sido maravilloso crecer contigo, tener a alguien con quien contar y vivir nuestros sueños de adultos. Luciana, es lindo verte crecer, disfrutar de tu fraternidad, cariño y amor... ustedes son el amor más bonito que tengo.

A Giovanni por sus enseñanzas, consejos y paciencia, sin su guía llevar a cabo este trabajo no hubiera sido posible.

A Don Julian, Andrés y Santiago por compartir sus saberes, aportar a mi vida profesional y personal, además, de sus consejos elocuentes y prácticos para la toma de decisiones.

A Juan Camilo y Walter por sus conocimientos transmitidos y su apoyo en esta última etapa del posgrado.

Y a las personas y amigos que, de una u otra forma han dejado una semilla cuyo tallo crece cada día esperando alcanzar la parte más alta del cielo.

Contenido

Contenido

Resumen	2
Abstract	5
Lista de tablas	11
Lista de Figuras	12
Lista de gráficas	13
Introducción	14
1. Objetivos	19
2. Marco teórico	20
2.1 Panorama internacional del mercado del oro	20
2.1.1 Oferta internacional del oro.....	21
2.1.2 Demanda internacional del oro	23
2.2 Panorama nacional del mercado del oro	25
2.2.1 Oferta nacional del oro.....	25
2.2.2 Producción nacional del oro (2012-2021).....	27
2.2.3 Demanda nacional del oro	28
2.2.4 Importaciones nacionales de oro (2012-2021)	29
2.2.5 Exportaciones nacionales de oro (2012-2021).....	29
2.3 Agentes que participan de la venta y compra de oro	31
2.3.1 Registro Único de Comercializadores de Minerales (RUCOM)	32
2.3.2 El RUCOM y la comercialización de oro	34
2.3.3 La comercialización de oro	36
2.4 Incertidumbres de los proyectos mineros, modelos de valoración económica y financieros y metodologías de valorización empleadas en minería y sus características	40
2.4.1 Riesgos y tipos de incertidumbres en la minería	41
2.4.2 ¿Qué es un modelo de evaluación económica y financiera?	43
2.4.3 Valor financiero de los proyectos y el manejo de incertidumbres	45
2.4.4 Metodologías tradicionales para la valoración de proyectos	46
2.4.5 Metodologías para la valoración de proyectos bajo incertidumbre	49
2.4.6.1 Opciones financieras	49
2.4.6.2 Opciones reales.....	50
2.4.6.3 Opciones reales “en proyectos” y opciones reales “sobre proyectos”	53
2.4.6.4 Tipos de opciones reales.....	53
2.4.6.5 Valoración de opciones reales.....	55
2.4.6.6 Ecuaciones diferenciales parciales (EDP)	57
2.4.6.7 Modelo binomial	58
2.4.6.8 Simulación Montecarlo	60
3 Estado del arte	63

4	Modelo de evaluación económica y financiera propuesto.....	78
4.1	Descripción general del modelo.....	78
4.2	Característica, consideraciones y restricciones	80
4.3	Nomenclatura de las variables	81
4.4	. Modelo de evaluación financiera	82
4.5	Función objetivo.....	83
5.	Validación del modelo propuesto	85
5.1	Modelo estocástico de baja certidumbre.....	85
5.2	Modelo estocástico de alta certidumbre.....	89
6.	Resultados y conclusiones	94
7.	Trabajos futuros.....	98
Anexos.....		100
Anexo A.....		100
Anexo B.....		103
Anexo C		106
Anexo D		109
Bibliografía		112

Lista de tablas

Tabla 1. Producción mundial minera de oro y reservas [15].	22
Tabla 2. Fuentes de incertidumbre endógena tomado de Urieta Gómez [7].	42
Tabla 3. Fuentes de incertidumbre exógena tomado de Urieta Gómez [7].	43
Tabla 4. Parámetros que influyen en el valor de una opción financiera y una opción real [81].	52
Tabla 5. Tipo de opciones reales [77].	55
Tabla 6. Tipo de modelos para solución de VOR [94].	62
Tabla 7. Nomenclatura de las variables involucradas. Elaboración propia	82
Tabla 8. Datos utilizados en el modelo de baja certidumbre.	86
Tabla 9. Resultados de modelo de baja certidumbre.	86
Tabla 10 Datos utilizados en el modelo estocástico	90
Tabla 11. Resultados del modelo estocástico de alta certidumbre	90
Tabla 12. Resultados VPN y rentabilidad propia modelo estocástico de baja certidumbre	100
Tabla 13. Resultados VPN y rentabilidad compra modelo estocástico de baja certidumbre	103
Tabla 14. Resultados VPN y rentabilidad propia modelo estocástico de alta certidumbre	106
Tabla 15. VPN y rentabilidad compra modelo estocástico de alta certidumbre.	109

Lista de Figuras

Figura 1. Demanda mundial de oro en los últimos 12 años [19].	25
Figura 2. Producción nacional de oro desde el año 212 hasta el segundo trimestre de 2022 [24].	27
Figura 3. Partida arancelaria. Cantidad y tipo de oro importado por año desde 2014 hasta septiembre de 2022 [24].	29
Figura 4. Producción (SIMCO) vs Exportaciones de oro no monetario [29].	31
Figura 5. Esquema de comercialización interna de oro [29].	39
Figura 6. Descuentos identificados a través de la cadena de comercialización [29].	40
Figura 7. Simulación Montecarlo y cono de incertidumbre [61].	61
Figura 8. Flujograma de los procesos de extracción, compra y beneficio de la empresa minera. Elaboración propia.	79
Figura 9. Metodología implementada para el diseño del modelo	83

Lista de gráficas

Gráfica 1. VPN Total modelo de baja certidumbre.	86
Gráfica 2. Porcentaje de variación explicado del VPN total	87
Gráfica 3. Rentabilidad total modelo de baja certidumbre	88
Gráfica 4. Porcentaje de variación explicado rentabilidad modelo de baja certidumbre.	89
Gráfica 5. VPN total del modelo estocástico de alta certidumbre	91
Gráfica 6. Porcentaje de variación explicado del VPN total del modelo estocástico de alta certidumbre.	92
Gráfica 7. Rentabilidad total del modelo estocástico de alta certidumbre	93
Gráfica 8. Porcentaje de variación explicado rentabilidad total del modelo estocástico de alta certidumbre	93
Gráfica 9. VPN propia del modelo de baja certidumbre	100
Gráfica 10. Porcentaje de variación explicado VPN propia.	101
Gráfica 11. Rentabilidad propia modelo estocástico de baja certidumbre.	101
Gráfica 12. Porcentaje de variación explicado rentabilidad propia modelo estocástico de baja certidumbre	102
Gráfica 13. VPN compra modelo de baja certidumbre	103
Gráfica 14. Porcentaje de variación explicado VPN compra modelo de baja certidumbre.	104
Gráfica 15. Rentabilidad compra modelo de baja certidumbre.	105
Gráfica 16. Porcentaje de variación explicado rentabilidad compra modelo de baja certidumbre	105
Gráfica 17. VPN propia modelo estocástico de alta certidumbre	106
Gráfica 18. Porcentaje de variación explicado VPN propia modelo estocástico de alta certidumbre.	107
Gráfica 19. Rentabilidad VPN propia modelo estocástico de alta certidumbre	107
Gráfica 20. Porcentaje de variación explicado rentabilidad propia modelo estocástico de alta certidumbre	108
Gráfica 21. VPN compra modelo estocástico de alta certidumbre	109
Gráfica 22. Porcentaje de variación VPN compra modelo estocástico de alta certidumbre	110
Gráfica 23. Rentabilidad compra modelo estocástico de alta certidumbre	110
Gráfica 24. Porcentaje de variación rentabilidad compra modelo estocástico de alta certidumbre	111

Introducción

Los depósitos minerales como base geológica de todo proyecto minero inicialmente son desconocidos, fijos en ubicación y tamaño, variables en calidad y objeto de inversión para su búsqueda y exploración. Como todo negocio, la minería busca extraer de la forma más rentable posible éstos. Lo anterior implica que los depósitos minerales deben ser medidos, delineados y delimitados con el propósito de conocer unas cantidades explotables de mineral que contienen uno o varios elementos de interés y de esta forma tomar decisiones de inversión durante la exploración y proseguir con unas de desarrollo industrial y costos de operación a lo largo de la construcción y montaje de las minas y el proceso de producción y su posterior cierre y abandono. Entonces, la cadena de suministro de minerales consiste en una serie de etapas y fases donde los minerales pasan de ser recursos geológicos a ser bienes negociables cuyo valor monetario va a depender de las condiciones de mercado, componentes geopolíticos, niveles de consumo, sucesos históricos y factores naturales y técnicos, entre otros. Cualquier decisión entonces, tendrá su base en el conocimiento del depósito.

La minería a pequeña escala formalizada en Colombia se asocia a la concesión menor de 150 hectáreas durante la fase de exploración y construcción y montaje y cuando se relaciona con la minería de filón (depósitos que pueden ser una veta hidrotermal, un dique magmático o una zona de falla mineralizada y que se caracterizan por ser ricos en Au, Ag y en menor proporción otros metales como Cu, Zn y Pb [1]), el metal más común a explotar es el oro y la producción por métodos subterráneos no supera las 15.000 toneladas de mineral por año y para explotaciones a cielo abierto volúmenes menores a 250.000 m³ por año [2], siendo ambos valores poco cuantiosos en comparación con las toneladas explotadas por las grandes empresas mineras.

Con base a la geología y la minería, se tiene por objeto el conocimiento del depósito, morfología de los cuerpos, la distribución espacial de sus leyes, la heterogeneidad

mineralógica, sus características geomecánicas y la determinación de los procesos mineralúrgicos y metalúrgicos [3]. Sin embargo, el sector de la pequeña minería formal en el país no cuenta con este significativo soporte técnico y la determinación de los métodos de explotación no son los adecuados y así, la explotación del recurso no es eficiente ni cumple con los parámetros de seguridad y salud en el trabajo, además, de una ausencia de planeamiento minero, el cual se requiere para una sucesión de procesos de extracción de acuerdo con unos parámetros que son posteriores al proceso de explotación y conservar un flujo de caja que permita mantener una operación sostenible y sustentable en el tiempo. Tal planeamiento minero debe tener en cuenta todas las incertidumbres (endógenas y exógenas) para conseguir una rentabilidad y unos rendimientos financieros esperados. Además, la recuperación en las plantas de beneficio, posteriores a los procesos de explotación no es cuantiosa, dejando un margen considerable respecto a la cantidad de metal recuperado y los beneficios económicos posteriores esperados por las ventas realizadas. Lo anterior, también, debido a tecnologías y técnicas que no son adecuadas para el tipo de mineral beneficiado. En Colombia para llevar a cabo la venta, de forma legal, de mineral *Run Of Mine* (ROM), concentrados de oro, lodos producto de beneficio o arenas ricas en oro, de forma legal, se debe contar con el Registro Único de Comercializadores de Minerales (RUCOM) de acuerdo con el tipo de productor de mineral y expedir un certificado de origen que permita llevar una trazabilidad del producto, ya sea para venta al interior del país o exportaciones fuera del mismo. La mayor parte de la pequeña y mediana minería realiza sus ventas a compradores internos de acuerdo con unas condiciones de mercado y negociación, donde estos compradores llevan el registro de trazabilidad del oro comprado, pero que poco se interesan por la idea de cooperar con las condiciones de trabajo de estas minas, la productividad, las técnicas mineras y ambientales, darle un valor agregado al mineral comprado y el crecimiento de un oro responsable [4].

Actualmente, es considerable incentivar a la minería legal de pequeña escala a que reflexione sobre toda la cadena de valor, el acceso a mercados locales y extranjeros, prácticas mineras y ambientales técnicas, y una excelente gestión social, a través de modelos económicos y programas que incentiven a una producción certificada bajo el marco legal del país. Con base en estos modelos se podrían crear y/o adaptar políticas y estrategias que permitan emplear unos principios de administración para la planificación

de empresas y técnicas de toma de decisión que permitan una adecuada evaluación de estos proyectos y generar una sustentabilidad en el tiempo. Las grandes compañías mineras se enfrentan a cambios en el volumen y requerimientos de la demanda, decrecimiento de las leyes de los depósitos minerales, características geográficas específicas, manejo del agua, desafíos energéticos, recursos humanos (RRHH), entre otros [4]. Con base en estos factores, para aumentar su competitividad, estas empresas deben optimizar sus procesos, generar nuevas ideas de negocio y proporcionarles el mayor valor a sus activos. Es por ello, que se crean modelos económicos donde este tipo de empresas adquieren productos minerales de pequeños productores teniendo en cuenta unos parámetros de calidad y trazabilidad, y en donde se busca conservar y/o aumentar una rentabilidad a través de un comercio justo.

Estos modelos de negocio, como cualquier otro, se encuentran relacionados con los factores anteriormente mencionados, los cuales son incertidumbres y riesgos. Las incertidumbres se clasifican como incertidumbres endógenas (geología de los yacimientos, geotecnia del depósito, recuperación metalúrgica de los metales de interés, disponibilidad de insumos, dilución, atraso de los proyectos, huelgas, entre otros) y exógenas (precio del commodity, precio de los subproductos, tasas de cambio, precios de energía, tasas de interés, disponibilidad de recursos financieros, la legislación, permisos ambientales, el comercio, entrada de nuevos productores, mejoramiento de tecnología actual, entre otros) [5]. Para hacer frente a estas incertidumbres, existen modelos de evaluación que permiten realizar una valoración de estos proyectos bajo tales incertidumbres. Un modelo de evaluación económica y financiera es una herramienta analítica para evaluar la viabilidad financiera de un proyecto. Es aquel ejercicio teórico-práctico mediante el cual se intenta identificar, valorar y comparar entre sí los costos y beneficios asociados a determinadas alternativas de proyecto con la finalidad de coadyuvar a decidir la más conveniente [6]. Estos modelos se basan en la estimación y proyección de los flujos de caja que, representan los ingresos y los costos que se generarán a lo largo de la vida útil del proyecto y que, mediante el empleo de algunas metodologías, permite incluir las incertidumbres

para obtener un panorama más claro que permita una gestión y flexibilidad para la toma de decisiones.

Existen diferentes metodologías para evaluar la viabilidad de los proyectos, entre estas se encuentran los métodos tradicionales (Flujos de caja descontados (FCD), valor presente neto (VPN) que son de carácter determinista y la tasa interna de retorno (TIR)) como un indicador financiero y que son útiles cuando los flujos de caja se estiman con precisión y no presentan variaciones en los parámetros de entrada [7] y cuando no hay opciones de flexibilidad disponibles [8]. Mientras que, por otro lado, existen metodologías alternativas que consideran opciones que podrían adaptarse a las condiciones reales de los proyectos [7]. Además, permiten la flexibilidad de gestión para cambiar o revisar decisiones con el tiempo de acuerdo con las condiciones de mercado [9]. La evaluación mediante los métodos alternativos reconoce las incertidumbres existentes del proyecto, además, permite el desarrollo de estrategias dinámicas para gestionar el riesgo y tomar decisiones de inversión. En este contexto, el uso de metodologías alternativas para la valoración de proyectos bajo incertidumbre se ha convertido en una herramienta esencial para la toma de decisiones en la industria minera.

Considerando el contexto y el panorama para la producción y comercialización de oro de la pequeña minería legal en Colombia y los riesgos e incertidumbres asociadas a cualquier tipo de modelo de negocio minero, se hace necesario la evaluación económica del modelo de compra de mineral a pequeños productores dentro del marco legal del país, apoyado en el modelo de compra de mineral a terceros de una empresa minera, en la búsqueda de las variables que más afectan a este y a los productores, incluyendo parámetros que pueden ser especialmente desafiantes debido a la incertidumbre en variables críticas como el precio de los metales, la tasa de cambio, el porcentaje de recuperación en planta de beneficio, costos de transporte y operacionales que, permita identificar políticas y estrategias para la venta de mineral que permitan la planificación minera estratégica para el sector de pequeña y mediana minería de oro. Para este trabajo se propone el empleo de la simulación Monte Carlo para evaluar los riesgos y oportunidades asociados del modelo de compra de mineral a terceros. En el primer capítulo de esta entrega se realizará una revisión del panorama de la producción de oro en el país, la actualidad legislativa para

la compra y venta de minerales en Colombia, los métodos empleados para la valoración de proyectos bajo incertidumbre y el empleo de herramientas para llevar a cabo estas valoraciones. Luego, en el segundo capítulo se describirán los antecedentes respecto a la evaluación y alternativas propuestas a los modelos de compra de mineral en otros países y evaluaciones bajo incertidumbre llevadas a cabo en proyectos auríferos. En tercer lugar, el estudio y la formulación del modelo. Por cuarto, la aplicación a un caso de estudio basado en el modelo de compra de mineral a terceros de una empresa minera usando la simulación Monte Carlo y finalmente la discusión de resultados y las conclusiones.

1. Objetivos

Objetivo general: Realizar la evaluación económica y financiera del modelo de compra de mineral a terceros de una empresa minera a través de una metodología de valoración de proyectos bajo incertidumbre que permita determinar la rentabilidad de la empresa.

Objetivos específicos:

- a. Determinar el comportamiento e impacto de variables de decisión tales como el precio del oro, contenido (Calidad-Ley o tenor) y cantidad de mineral comprado, condiciones negociación y porcentaje de recuperación para el modelo de compra de mineral de una empresa minera.
- b. Evaluar la rentabilidad del modelo de la empresa minera antes diferentes escenarios técnicos.
- c. Identificar políticas y estrategias para la venta de mineral que permitan la planificación minera estratégica para el sector de pequeña y mediana minería de oro.
- d. Proponer un modelo de evaluación económica y financiera de compra de mineral a terceros de una empresa minera por medio de valoración de proyectos bajo incertidumbre.

2. Marco teórico

En esta sección, se describirá el marco conceptual que se empleará en la presente entrega. Primero se ilustrará la situación general del mercado del oro a nivel global, luego se analizará la oferta, producción y demanda nacional, aspectos claves de la comercialización de este metal en Colombia, los principales agentes que participan en la comercialización y un análisis jurídico y técnico de los requerimientos, procedimientos, y protocolos vigentes en Colombia para la comercialización legal del oro y control y fiscalización a la cadena de comercialización. En segunda instancia, se describirán los riesgos e incertidumbres asociadas a los proyectos mineros. Por último, se definirán los modelos para la valoración de proyectos teniendo en cuenta los modelos determinísticos y alternativos que se han empleado para investigaciones similares y que permiten el análisis de los riesgos e incertidumbre.

2.1 Panorama internacional del mercado del oro

El oro se ha convertido en un metal valioso debido a varias razones. Aunque su extracción se lleva a cabo en todos los continentes, menos en la Antártida [10], en primer lugar, es un metal difícil de encontrar en grandes concentraciones en la naturaleza, cada vez es más escaso [11]. Diferentes estudios alrededor del mundo muestran que las leyes de metales como el oro, el cobre, el platino y otros metales seguirán disminuyendo a finales de 2030 [12], [13]. Seguidamente, por sus características químicas y físicas, se emplea desde joyería hasta medicina. En tercer lugar, según el Banco Mundial, debido al alza en el precio, se acoge como un activo refugio, esto a razón de las incertidumbres causadas por la pandemia del COVID 19 y las tasas de interés ultra bajas a medida que los principales bancos centrales continuaron con sus políticas monetarias expansivas, a lo que se agrega conjuntamente un debilitamiento del dólar estadounidense y las interrupciones en el suministro de productores con México, Perú y Sudáfrica y el oro reciclado (Prácticamente, todo el oro extraído aún se continúa utilizando [10]) [14]. Y, por último, la minería de oro legal crea empleos bien remunerados y genera importantes ingresos fiscales donde se

llevan a cabo sus actividades. Para el año 2020, 31 empresas afiliadas al World Gold Council (WGC por sus siglas en inglés) generaron 200.000 empleos directos y en promedio los sueldos fueron 6% superiores al promedio nacional. Además, las empresas afiliadas pagaron 7.600 millones de dólares a los gobiernos de los países propietarios del recurso en concepto de impuestos corporativos, impuestos sobre el empleo, otros tipos de impuestos y regalías. Estos pagos se rigen por los regímenes fiscales y los acuerdos de explotación que deben cumplir las empresas para acceder a un yacimiento mineral [10]. En las siguientes secciones, se realizará una revisión general al panorama del oro a nivel internacional y nacional.

2.1.1 Oferta internacional del oro

Frente a la oferta internacional del oro. Este elemento es un metal no renovable, como elemento puede seguir otros ciclos donde se puede fundir y volver a concentrarse nuevamente y aunque sus concentraciones tienden a disminuir, constantemente la actividad de la tierra está formando nuevos depósitos, sin embargo, este proceso puede tardar de miles a millones de años [11]. Según el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés), las principales reservas de oro para el año 2022, se encuentran alojadas en Australia, Sudáfrica y Rusia con 8.400, 5.000 y 6.800 toneladas del metal respectivamente, y a nivel mundial se estiman unas 52.000 toneladas de oro contenidas [15]. [15]

La producción de oro primario para el año 2022 fue liderada por China, con un 10.7% de la producción total. Los 4 principales productores representan en conjunto un 38.5% de la producción total. Se estima que la producción minera de oro alrededor del mundo se mantuvo sin mayores cambios en contraste con el 2021. Aunque hubo una disminución en la producción en países como Papúa Nueva Guinea y Estados Unidos, esta reducción fue compensada por la producción llevada a cabo por Colombia, Indonesia y Burkina Faso [15]. En la otra mano, el WGC, estima que la cantidad de oro reciclado fue de 1.144,1 toneladas [16]. En la **Tabla 1** se observa la producción mundial de oro

País	Producción minera (t)		Reservas
	2021	2022	(t)
China	329	330	1.900
Rusia	320	320	6.800
Australia	315	320	8.400
Canadá	223	220	2.300
Estados Unidos	187	170	3.000
México	120	120	1.400
Kazajistán	116	120	1.000
Sudáfrica	107	110	5.000
Uzbekistán	100	100	1.800
Perú	97	100	2.900
Ghana	88	90	1.000
Burkina Faso	67	70	NA
Indonesia	66	70	2.600
Brasil	61	60	2.400
Tanzania	60	60	NA
Colombia	55	60	NA
Papúa Nueva Guinea	54	50	1.100
Malí	51	50	800
Sudán	50	50	NA
Otros países	626	620	9.200
Total mundial (redondeado)	3.090	3.100	52.000

*Datos reportados en toneladas

Tabla 1. Producción mundial minera de oro y reservas [15].

Entre el 2010 y 2018, la producción aumentó un 22% debido al crecimiento en la producción en África y la Comunidad de Estados Independientes (CEI) [10]. Sin embargo, desde este año se ha experimentado un leve descenso ya que muchas minas en producción están agotando sus reservas y la puesta en producción de nuevas minas es poca. Además, en 2020, la pandemia del COVID 19 creó restricciones que repercutieron en una disminución en la producción [10].

La producción de oro es desarrollada por diferentes tamaños de operaciones mineras. De acuerdo con el marco legislativo de cada país, las definiciones para la Minería a Gran

Escala (MGE), la Minería Artesanal y de Pequeña Escala (MAPE) y la de mediana escala pueden variar, cambiando la separación o agrupación entre los mismos de acuerdo con sus parámetros propios de clasificación, por ejemplo, en un determinado país una operación podría ser a gran escala mientras que en otro es de considerarse como una de pequeña escala o mediana, hecho que genera la cobertura y participación de diferentes tamaños de empresas [17], [18]. La MGE representa alrededor de un 80% de la producción global de oro, mientras que la MAPE el 20% restante [10]. La MGE se caracteriza por las altas inversiones en sus inicios, antes del ciclo de producción o la obtención de algún rendimiento, al igual que requiere de una inversión adicional de mantenimiento que se prolonga por largos periodos. También, está sujeta a estrictos controles reglamentarios, permisos e inspecciones que incluyen rigurosos requisitos de explotación y está sujeta a normas de seguridad y salud en el trabajo, gestión social e impacto ambiental [10]. Por otro lado, la MAPE, debido a sus métodos de producción sencillos, requiere de una ostentosa mano de obra y se encuentra asociada como un medio de subsistencia para millones de personas y a menudo se desarrolla al margen de las estructuras legales formales.

2.1.2 Demanda internacional del oro

La demanda de oro a nivel mundial durante el año 2022 se distribuyó así: joyería, 47%; lingotes, 17%; bancos centrales y otras instituciones, 20%; monedas y medallas oficiales y monedas de imitación, 9%; productos para las industrias eléctricas y electrónicas, 6%; y otros, 1% [15] como se muestra en la figura 1. Excluyendo la actividad de venta libre (OTC por sus siglas en inglés) la demanda saltó un 18%, alcanzado un total de 4.741 toneladas. Como es apreciable, por un margen holgado, la principal demanda del oro se aplica a la joyería, la cual, también, tiene una consideración por un apetito de inversión. Durante los primeros 9 meses de 2022 la demanda por oro para joyería aumentó un 5% [15]. Los consumidores están asociados a fabricantes de joyas que pueden distribuir sus productos en pequeñas tiendas o artesanos individuales, no obstante, la distribución de los pequeños fabricantes puede estar apoyada por mayoristas. Para el caso de las grandes industrias, algunas de ellas cubren toda la cadena de producción, distribución y venta, pero, en mayor proporción estas no se encuentran verticalmente integradas [14].

En segundo lugar, los lingotes, sin posterior fabricación o procesamiento son empleados con fines de inversión debido al precio del metal y menor riesgo a perder valor en comparación con el dinero en efectivo y otras divisas [14], su demanda a nivel mundial para los primeros 9 meses de 2022, disminuyó un 3% [15].

Como se mencionó, debido a las propiedades químicas y físicas del oro, las aplicaciones eléctricas y electrónicas representan un 6% de la demanda siendo el uso industrial más relevante. Se usa en aplicaciones de bajo voltaje, en conectores, interruptores y contactos de relé, cables de conexión, también es posible encontrarlo en computadoras, equipos de telecomunicaciones, equipamiento para automóviles y defensa y en general en productos que tienen un alto contenido de semiconductores tales como pantallas planas y tablets [14]. En cuanto a su uso en medicina, se destacan las llamadas “sales de oro” que, se emplean para el tratamiento de la artritis y nanopartículas del metal precioso para combatir el cáncer. Además, se aprovecha para introducir genes en las células en las aplicaciones de ingeniería genética [11]. Durante el 2022, la demanda de oro para aplicaciones industriales se mantuvo sin cambios respecto a 2021, sin embargo, su empleo para artefactos electrónicos disminuyó un 4% en los primeros 9 meses del año [15].

Por otro lado, las casas de moneda no emplean el oro para la fabricación de monedas oficiales de transacción efectivamente, ya que su cuantía excedería por mucho el valor de una transacción, sin embargo, existen en el mercado monedas no oficiales acuñadas por estas mismas casas y que se utilizan como fines de inversión. La demanda de oro para la fabricación de monedas y medallas aumentó un 15% en comparación con los primeros 9 meses del 2021 [15].

Respecto al precio, el promedio anual para 2022 registró un récord de 1.800 dólares por onza. Este, aumentó durante el primer semestre, disminuyó en el segundo y experimentó una fluctuación durante el tercer trimestre. El precio del oro cerró el año con una ganancia marginal, a pesar de enfrentar vientos en contra notables por la fortaleza del dólar estadounidense y el aumento de las tasas de interés mundiales, diversos factores causaron el aumento en el precio como la demanda de oro para la compra de refugio seguro aumentó debido a la continua pandemia de la enfermedad por coronavirus 2019 (COVID-19) y la incertidumbre global de los inversores [15].

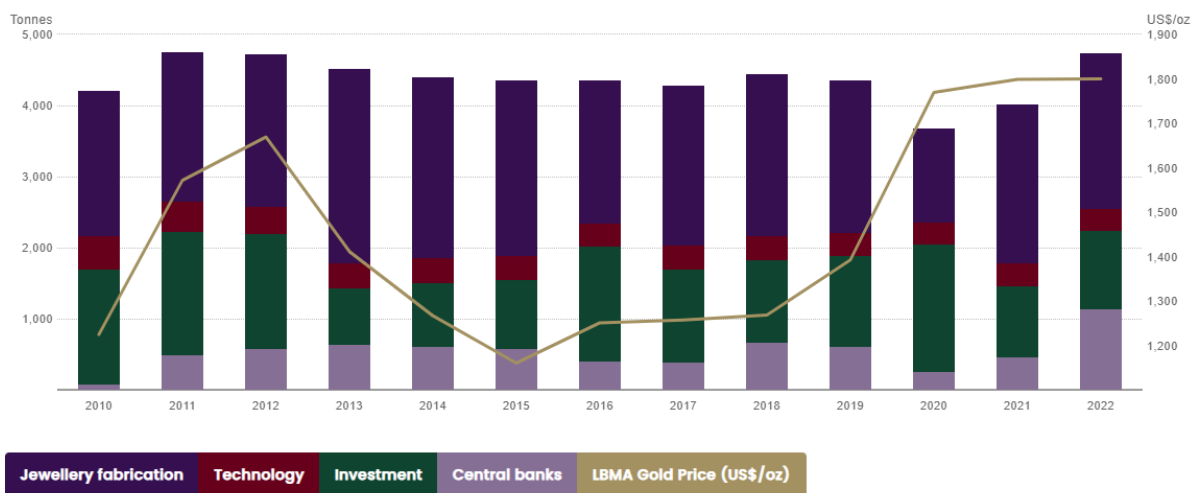


Figura 1. Demanda mundial de oro en los últimos 12 años [19].

2.2 Panorama nacional del mercado del oro

2.2.1 Oferta nacional del oro

La Agencia Nacional de Minería (ANM), en el año 2021 entregó un compilado de títulos mineros otorgados, con un total de 2.062, distribuidos en 1.420 en etapa de explotación, 166 en construcción y montaje y 467 en exploración [20]. Los principales yacimientos de oro se encuentran en Antioquia, Santander, Tolima, Huila, Caldas, Nariño, Cauca, Bolívar, Chocó, Vaupés y Guainía [14]. En la actualidad, la distribución se desconoce debido al bajo flujo de información verificada y suministrada por los diferentes medios oficiales, por lo cual, se dificulta calcular la oferta.

Colombia se ha destacado desde la época precolombina como un país explotador de oro por tradición, donde se destaca su aporte hasta 1937 como el mayor productor de Suramérica [14]. El país actualmente cuenta con varias operaciones mineras a lo largo del

territorio, tanto para minería subterránea como minería aluvial, dentro de estas se destacan Zijin-Continental gold (Buriticá- Antioquia), Antioquia Gold (Cisneros – Antioquia), Mineros S.A. (El Bagre-Antioquia), Soma Gold (El Bagre-Antioquia) y Aris Mining (Marmato-Caldas y Segovia-Antioquia). En un reporte realizado por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), para el año 2018 Colombia contaba con diez depósitos de más de 1 millón de onzas de oro en recursos declarados [14], los cuales corresponden en su mayoría a depósitos de baja y media ley.

La mayor parte del oro producto de la minería proviene de explotaciones aluviales [14], no obstante, se identifica que el mayor potencial a futuro puede provenir de los cuerpos filonianos que se encuentran dispersos en la región andina o yacimientos con poca explotación [14]. Las explotaciones se hacen de forma subterránea y a cielo abierto. El minado subterráneo es realizado en los depósitos vetiformes de forma convencional, semimecanizada y mecanizada, en este tipo de explotación resalta la operación subterránea llevada a cabo en el municipio de Buriticá por Zijin Continental Gold, la cual es la más grande del país y está catalogada como minería a gran escala con una extracción diaria de 3.712 toneladas y la cual alcanzó una producción de 796.306 onzas de doré en 2022 [21]. Por otro lado, la producción derivada de terrazas es realizada por mineros de tradición (barequeros) y/o pequeños mineros por metodologías manuales de extracción y separación o maquinaria robusta [22].

Aparte de los proyectos en producción, existen depósitos minerales ricos en oro que podrían llegar a una fase de explotación como se mencionó anteriormente, este panorama dependerá de la estabilidad institucional del país, situaciones técnicas y ambientales propias de los depósitos, localización, relación de las empresas con las comunidades, planeamiento y desarrollo estratégico para la sustentabilidad y las condiciones de mercado, ya que existen proyectos que han sido archivados por decisiones gubernamentales como La Colosa (Cajamarca – Tolima) y Soto Norte (California – Santander) que en total hubieran aportado aproximadamente 37,1 millones de Onzas de oro [14], [23]. Sin embargo, es válido mencionar que la oferta actual no ha alcanzado su punto máximo de acuerdo con estimaciones previas, teniendo en cuenta los proyectos que se vienen forjando a futuro como los son el Proyecto Gramalote de AngloGold Ashanti (San

Roque – Antioquia), Minera Quinchía y Minera Miraflores (Quinchía – Risaralda) que podrían ingresar en operación.

2.2.2 Producción nacional del oro (2012-2021)

La producción nacional de oro total estimada para el año 2022, según el USGS, fue de 60 toneladas [15]. Acorde con la información provista por la UPME, se observa en la **Figura 2** que, la producción ha disminuido desde el año 2016 pasando de 63,16 toneladas a 48,56 toneladas para el año 2020. No obstante, se observa un repunte para el año 2021 con 55,32 toneladas [14], [24]. Para este mismo año, existieron 4 productores primarios, el primer lugar fue ocupado por el departamento de Antioquia que produjo 39,03 toneladas (70,55%), seguido de Chocó con 6,3 toneladas (11,45%), luego se encuentra Bolívar con 3,6 toneladas (6,53%) y en cuarto lugar Caldas cuyo aporte fue de 2.2 toneladas (4,14%) [24].

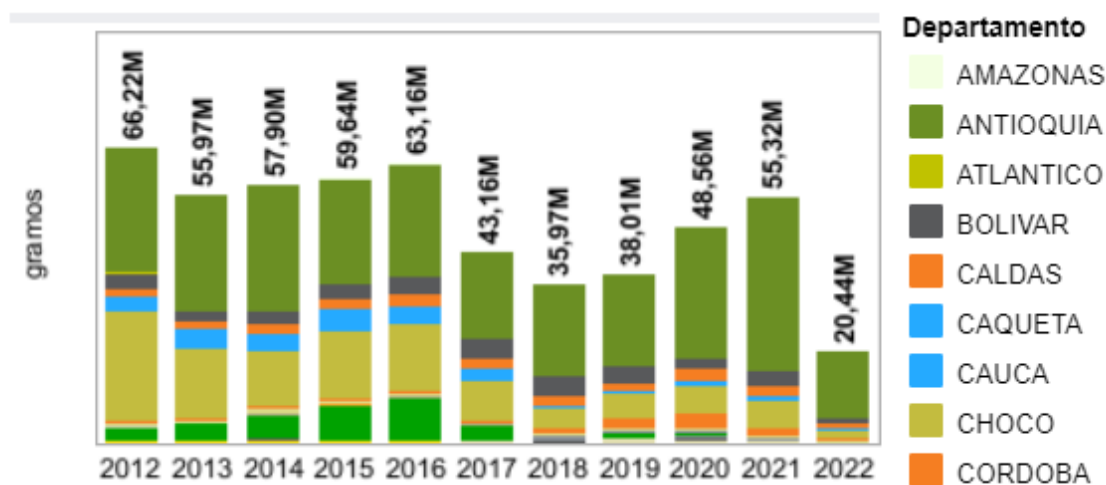


Figura 2. Producción nacional de oro desde el año 2012 hasta el segundo trimestre de 2022 [24].

El sector minero juega un papel importante dentro de la economía del país, y así lo denota el Sistema Nacional de Regalías que para el año 2021 captó en dinero por concepto de oro el valor en pesos colombianos de 326.000,5 millones [24]. Además, este metal es uno de los principales recursos minero-energéticos del país detrás del carbón, gas natural,

mineral de hierro y ferroníquel y que ocupó el quinto puesto en exportaciones para el año 2021 [25]. Adicional, Colombia, ha ido tomando un papel preponderante en la producción de oro a nivel latinoamericano, estando en el cuarto puesto detrás de grandes productores como México, Perú y Brasil [26].

2.2.3 Demanda nacional del oro

Los datos correspondientes a la demanda nacional de oro son escasos, existen pocos estudios correspondientes a esta temática, sin embargo, entidades como el Banco de la República y la UPME han puesto esfuerzos para estimar las cifras. El Banco de la República replicando su modelo en conjunto con la Universidad EAFIT en 2014 [27], utilizaron datos de la encuesta Anual Manufacturera (EAM) y la Gran Encuesta Integrada de hogares (GEIH) de 2017 con el fin de calcular el número de personas que trabajaban en el sector joyero y hallar la producción por empresa, encontrando que la producción media por joyero es de 9,5 kg de joyas por año y una estimación de demanda anual para el sector de 752 kg de oro por año, sin embargo, el modelo contó con poca cantidad de empresas analizadas lo que dificulta la precisión de los resultados.

Por otro lado, en el estudio realizado por la UPME en el año 2018, se estima que Colombia demanda de 1 tonelada de oro donde el 76 % se emplea para joyería [28], cifra que es similar a la reportada por el Banco de la República. La industria de la orfebrería en el país está en un 98% conformada por las pequeñas y medianas empresas (PYMES) que hacen su operación sustentable gracias a el manejo de sus costos. Sin embargo, teniendo en cuenta ciertas consideraciones como las capacidades inherentes de producción, la variabilidad en el mercado y el stock controlado por los mismos productores dificultan una estimación precisa de la demanda actual del metal.

2.2.4 Importaciones nacionales de oro (2012-2021)

Colombia como país productor, no reporta cantidades cuantiosas de importaciones de oro en estado puro. La mayor parte de las importaciones corresponden a formas de oro semilibradas para uso no monetario y minerales de oro y sus concentrados. A septiembre de 2022, el total de oro importado fue de 1,43 kilos, cifra mucho menor que a las reportadas entre los años 2018 y 2021, como se ilustra en la figura 3.

De acuerdo con los datos acumulados desde el año 2014, el principal vendedor de oro hacia Colombia es Estados Unidos, las importaciones provenientes de este país norteamericano corresponden a 63,24 kilos de oro (29,60). En segundo lugar, se encuentra Canadá, cuya cantidad de oro importada es de 41,15 kilos (19,26%); luego se halla China con una cantidad de 40,00 kilos (18,72%) y después Italia y Reino Unido con un aporte de 23,35 (10,93%) y 4,28 kilos (2%) respectivamente. Es de tener en cuenta que, el consumo interno, asciende a una cantidad de 38,69 kilos.

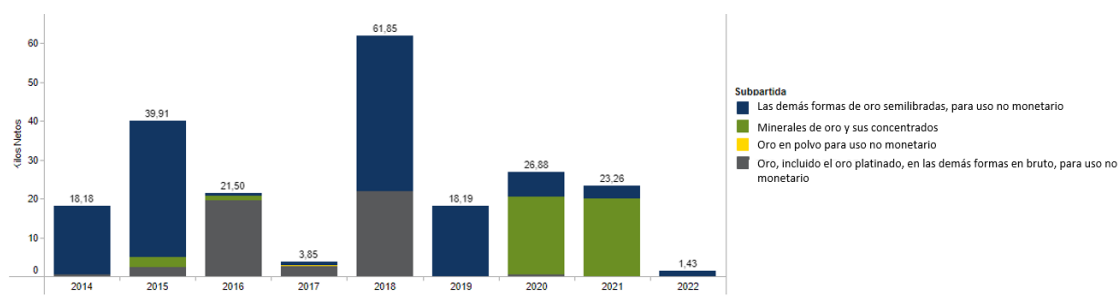


Figura 3. Partida arancelaria. Cantidad y tipo de oro importado por año desde 2014 hasta septiembre de 2022 [24].

2.2.5 Exportaciones nacionales de oro (2012-2021)

De acuerdo con datos suministrados por la UPME, para el año 2016 se estima que el 21,7% de las exportaciones del país fueron productos de la minería [14], de las cuales, el 23% de las exportaciones fueron oro, con una participación en el mercado global de oro de 47 toneladas (0,30%) siendo Estados Unidos y Suiza los principales compradores [14]. En estudios realizados por la empresa EConcept en conjunto con el Banco de la República

en el año 2019, para conciliar las cifras nacionales, entre producción y exportaciones que entran en las cuentas nacionales, es apreciable que existe una diferencia entre los datos proporcionados por el Sistema de información minero colombiano (SIMCO) y el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Es de considerar que, el DANE realiza un proceso de 3 pasos para el cálculo de las cifras nacionales.

1. **Infiere el volumen producido de oro minero:** esta entidad infiere el volumen producido de oro minero sin utilizar la información oficial sobre la producción. Para ello, emplea las cantidades de oro exportada reportadas por la DIAN, también el consumo intermedio el cual se divide entre el consumo intermedio de Joyería y el consumo intermedio industrial (ambos estimados). Ambos provenientes de la Encuesta Anual Manufacturera (EAM) y por último la variación de existencia en la industria, la cual se obtiene de las cantidades exportadas de oro y a partir de la producción de joyería y de la producción industrial relevante calcula el consumo intermedio de oro. Por último, pregunta a los industriales por la evolución de sus inventarios de oro.
2. **Infiere el valor de la producción de oro minero:** Esta inferencia resulta de utilizar las exportaciones de oro reportados por la DIAN y suponer una pérdida del 6% en la transformación para la exportación (ejemplo: para producir 94 gr de oro de exportación, se requieren 100 gr de oro minero). Y finalmente se supone un margen de comercialización de 10% para obtener el valor de producción de oro minero [29].
3. **Calcula el precio implícito del oro minero:** Obtenidas las cantidades y el valor estimado, el DANE procede con el cálculo del precio implícito del oro.

Esta metodología empleada por el DANE puede conllevar unas ciertas limitaciones. Una de estas, es que la producción puede ser subestimada ya que se emplea como dato oficial la cantidad de exportaciones registradas por lo que, entre mayor contrabando internacional de oro colombiano, mayor será la subestimación y la dificultad para conciliar las cuentas nacionales del sector minero. Comparando los datos suministrados por el SIMCO respecto a la producción y la serie de exportaciones de oro no monetario del DANE, es apreciable

que ambas informaciones no son concordantes. De acuerdo con la figura 4, es posible observar, por ejemplo, que para el año 2018 se presenta un excedente de exportaciones de 19.7 toneladas. O sea, se está exportando más oro del que se está produciendo, por lo que puede estarse realizando una subestimación de la producción y que dicho excedente puede ser producto del mercado ilegal en Colombia [29]. Según datos económicos de la ANM, el total de oro exportado para el año 2021 fue de 79,4 toneladas [20].

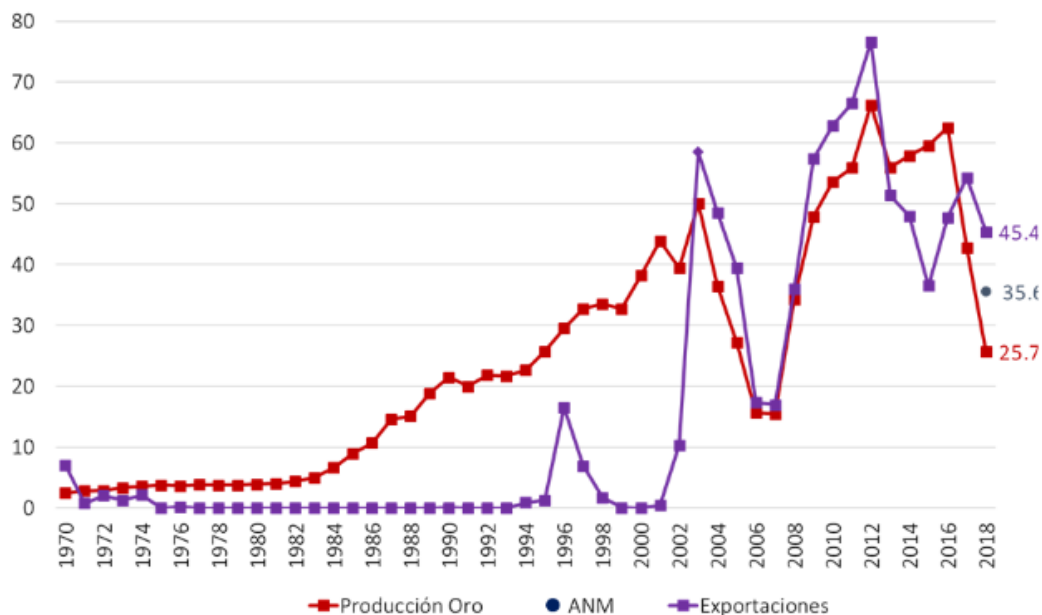


Figura 4. Producción (SIMCO) vs Exportaciones de oro no monetario [29].

2.3 Agentes que participan de la venta y compra de oro

Existen diferentes figuras dentro de la normativa minera vigente colombiana para realizar la explotación, beneficio, comercialización y venta de metales básicos y preciosos. El Estado Colombiano en aras de controlar estos agentes ha creado el Registro Único de Comercializadores de Minerales (RUCOM) para la vigilancia de la explotación y comercialización de minerales, además, ha definido el tipo de explotadores y

comercializadores. En esta sección, se presentará el RUCOM y los principales agentes que participan de la venta y compra de oro.

2.3.1 Registro Único de Comercializadores de Minerales (RUCOM)

El RUCOM es una medida de control que, permite certificar a las personas naturales y jurídicas que comercializan, consumen o benefician minerales en Colombia, con el fin de proporcionarle más transparencia a la actividad comercializadora de minerales en el país [30]. Desde el punto de vista legal, para el Estado colombiano, el RUCOM constituye el elemento principal para determinar el origen y la viabilidad de la comercialización de minerales. Es administrado por la ANM mediante su plataforma digital y fue reglamentado mediante el artículo 112 de la Ley 450 de 2011 1-Plan Nacional de Desarrollo 2010- 2014 y ratificado con la Ley 1753 de 2015 - Artículo 267- Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018, para adoptar medidas de control a la comercialización de minerales en el territorio nacional [30]. Además, dado el artículo 327 parágrafo 1 de la Ley 1955 de 2019 - Plan Nacional de Desarrollo 2018- 2022 donde se delega a la Autoridad Minera la administración del sistema de información para el registro de los mineros de subsistencia, que permita el desarrollo de su actividad previa inscripción y aprobación ante el alcalde municipal [31], el RUCOM será el encargado de publicar en su lista como explotadores mineros autorizados a los mineros de subsistencia después de cumplidos sus trámites de inscripción en el Módulo GÉNESIS de la ANM donde se podrá realizar seguimiento de los mineros inscritos de acuerdo con la Resolución Número 623 del 29 de diciembre de 2020 que da cumplimiento al artículo 327 del Plan Nacional de desarrollo 2018-2022 [32]. Dadas las funciones mencionadas de esta herramienta, en el RUCOM deben inscribirse aquellas personas naturales y jurídicas que compran y venden minerales, además, las casas de compra y venta que adquieran mineral a los explotadores mineros autorizados. Además, cuando las plantas de beneficio realizan el servicio para la transformación de minerales a diferentes títulos, estas, deben inscribirse en el RUCOM bajo el rol de planta de beneficio. En resumen, los agentes que deben inscribirse son explotadores mineros autorizados, comercializadores de minerales autorizados, Comercializadoras Internacionales (C.I.),

barequeros, transportadores de minerales, subcontratistas de formalización, beneficiarios de áreas de reserva especial, solicitantes de legalización, plantas de beneficio y los mineros de subsistencia[33], ya que Por otra parte, no están obligados a inscribirse en el RUCOM los explotadores mineros autorizados que comercialicen o adquieran productos ya elaborados para joyería y las personas naturales o jurídicas que aprehendan minerales para actividades diferentes a la comercialización [30]. Explotadores mineros autorizados y comercializadores de minerales

A continuación, se enuncian los explotadores mineros autorizados, de acuerdo con el Artículo 1 del Decreto 276 de 2015 y la Cartilla Minera:

1. **Titular Minero en etapa de Explotación:** Es una persona natural o jurídica beneficiaria de un título minero que reposa de forma debida en el Registro Minero Nacional, conforme a la Ley 685 de 2001 o demás normas que la modifiquen o sustituya [34].
2. **Solicitante de legalización de minería de hecho:** Son solicitantes del programa de legalización de minería de hecho que se tramitó bajo la Ley 685 de 2001 [30], [35].
3. **Solicitante de formalización minera:** Son Solicitantes de formalización minera que recogen las solicitudes de legalización de minería tradicional radicadas bajo la vigencia de la Ley 1382 de 2010 [35].
4. **Beneficiarios de áreas de reserva especial:** Son los solicitantes de un proceso de legalización para comunidades mineras tradicionales en áreas libres (Art. 31 de la Ley 685 de 2001) y que por sus características socioeconómicas se constituyen en su principal fuente de abastecimiento regional de los minerales extraídos [36], [37].
5. **Subcontratista de formalización minera:** son personas naturales o jurídicas que realizan negocios jurídicos, acuerdos de voluntad privados, celebrados entre titulares y los explotadores mineros de pequeña escala o pequeños mineros que están realizando actividades mineras dentro del área de un título minero inscrito en el Registro Minero Nacional antes del 15 de julio de 2013, para que prosigan con la actividad bajo el amparo del título, sin que por ese efecto se fraccione o divida el título minero [38].

6. **Barequeros:** Son personas naturales que realizan el lavado de arenas por medios manuales sin ninguna ayuda de maquinaria o medios mecánicos. Es una actividad común en terrenos aluviales. El objeto del lavado manual es separar y recoger los metales preciosos y que, igualmente permite la recolección de piedras preciosas y semipreciosas por medios similares a los aquí descritos, de conformidad con lo dispuesto por el artículo 155 y siguientes de la Ley 685 de 2001 [34].
7. **Chatarreros:** Es una persona natural que se dedica a la recolección manual de mineral con contenido de metales preciosos presente en los desechos de las explotaciones mineras [34].
8. **Comercializador de minerales autorizado:** Es una persona natural o jurídica que de forma habitual compra y vende minerales para transformarlos, beneficiarlos, distribuirlos, intermediarlos, exportarlos o consumirlos, debidamente inscritos en el Registro Único de Comercializadores de Minerales, y que cuente con la certificación de la Agencia Nacional de Minería donde conste dicha inscripción [34].
9. **Comercializador de minerales:** Es una persona natural o jurídica que se dedica regularmente a la compra y venta de minerales para transformarlos, beneficiarlos, distribuirlos, intermediarlos, exportarlos o consumirlos.

2.3.2 El RUCOM y la comercialización de oro

De acuerdo con el informe realizado por la empresa EConcept en el año 2019, en datos proporcionados por el RUCOM, en lo que concierne al oro, se resalta que 57.039 inscripciones relacionadas con la explotación de oro, 50,600 corresponden a barequeros y 3.333 a explotación de subsistencia diferente a la anterior, mientras que apenas 1.007 son de agentes con título minero [33]. Lo anterior demuestra que la mayor parte de la producción aurífera en Colombia proviene de la minería artesanal [29].

La forma más común de la minería artesanal es la denominada minería de subsistencia. La explotación habitual para este tipo de minería es el barequeo, operación que es netamente artesanal, lo que implica unas condiciones de trabajo diferentes a las operaciones de los titulares mineros. Los barequeros realizan su proceso de inscripción

ante las alcaldías y tienen unos topes de producción establecidos de 35 gramos al mes y 420 al año [29]. Sin embargo, aunque existen estos límites para la producción, hay un flujo de oro ilegal donde antes al margen de la ley solicitan al barequero que realice un reporte que le permita inflar su producción con el propósito de vestir al oro ilegal como legal. No obstante, el lavado de oro ilegal no solo es llevado a cabo por los barqueros, los mineros informales también son responsables de este tipo de flujos. Es de considerar que, hay dos clases de oro identificados: El tipo A y el tipo B. El primero es que se produce de acuerdo con las normas establecidas por la ley, mientras que el segundo es el que ni debería producirse ya que su obtención se realiza sin las debidas autorizaciones. En el caso de los mineros informales, todo el oro que producen es tipo B dado que no cuentan con una autorización legal para trabajar. Por otro lado, los mineros en procesos de formalización incurren en un proceso similar al que ocurre con los barequeros, puesto que, debido a la falta de un control óptimo sobre sus actividades, es fácil atribuirles producción que no han realizado, además, para estos no existen límites de producción establecidos, por lo que, grandes cantidades de oro tipo B pueden ser absorbidas

Es relevante destacar que el lavado de oro ilegal surge de la posibilidad de producir oro tipo B. Estos dos flujos de oro se pueden estar produciendo acorde a las siguientes situaciones: i) presencia de grupos criminales en las zonas de producción que emplean el nombre de los barequeros y otro tipo de explotadores permitidos inscritos en el RUCOM; ii) la diferencia entra las rentas generadas por la venta de oro ilegal y su precio cuando se hace legal; iii) el oro es un material fácil de esconder e indiferenciable, del alto valor por unidad de masa, de difícil control para las autoridades; iv) por las condiciones de pobreza de muchas de las zonas productoras de oro ilegal; y v) por la falta de fiscalización y las barreras pobres de entrada a este tipo de actividad [33]. El último factor es determinante, ya que es donde a través de prácticas poco técnicas mineras y ambientales, se realizan explotaciones de forma descontrolada, con bajos estándares de seguridad y salud en el trabajo, recuperación mínima del metal precioso y daños ambientales irreversibles. También es de considerar que la mayor parte de la pequeña y mediana minería no cuentan con una evaluación financiera de sus proyectos, ni poseen ingreso a programas para la adquisición de recursos y mucho menos realizan un cálculo de los recursos y reservas dados sus mínimos recursos para la exploración.

2.3.3 La comercialización de oro

El Banco de la República a través del Decreto 444 de 1967 manejó el monopsonio en la comercialización del oro en Colombia hasta que la Ley 9 de 1991, en su artículo 13 determinó que “[l]a compra, venta y posesión de oro en polvo, en barra o amonedado será libre” [29]. De esta forma, el Banco tomó la figura como un comprador más del mercado y esto supuso abandonar el oro como el principal medio para la acumulación de reservas internacionales [29].

La situación descrita, ocasionó una apertura de diferentes puntos de compra alrededor de los principales sitios de producción del país. De acuerdo con las cifras proporcionadas por EConcept, para el año 2018 en el RUCOM habían registrados 1.406 comercializadores de cualquier índole [29], la cual es onerosa respecto a los 27 puntos de compra que logró establecer el Banco de la República durante su periodo de monopsonio. No obstante, el Banco continúa ejerciendo un papel importante en la compra de oro ya que su procedimiento es bastante claro, donde se emplea el precio Fix a.m. de la bolsa de Londres, la tasa representativa del mercado (TRM) y unos descuentos por regalías, gravámenes, fundición, ensaye y refinación. Además, de que el pago lo realiza a los 3 días hábiles de entregado el producto mediante transferencia electrónica lo que es un proceso atractivo para la pequeña y mediana minería. También, es relevante resaltar que, es posible, de acuerdo con las problemáticas mencionadas en la sección 1.3.3, que existan más puntos de compra que no se encuentren registrados en el RUCOM.

Los agentes que participan de la comercialización llevan su producto (Minerales de oro y sus concentrados u oro refinado) a los sitios de compra y venta autorizados, o en su defecto, a las plantas de beneficio para la transformación y beneficio, las cuales, conforme al modelo de negocio, pueden entregar un producto de acuerdo con unas características específicas al cliente o en su defecto realizar la compra sobre un mineral bruto o concentrado para proceder después con ese beneficio y un proceso de venta con un comprador local o internacional. Dado que el RUCOM es la herramienta de control del Estado para dar la veracidad y transparencia para la comercialización de minerales,

mediante el artículo 10 del Decreto 276 de 2015, todo mineral comercializado debe estar respaldado por su Certificado de Origen. Este documento se emite para certificar la procedencia lícita del mineral que se transporta, transforme, distribuya, intermedie o comercialice, el cual deberá ser expedido por el Explotador Minero Autorizado o comercializador y no tendrá fecha de vencimiento alguno [34]. Además, es de tener en cuenta que, mediante el *Decreto 600 de 1996. Modificado por el Decreto 4479 de 2009, el Gobierno Nacional estableció medidas de control para la exportación de metales preciosos y en el artículo 20 dispuso que: Quien pretenda realizar una exportación de oro, plata y platino, sin transformar, deberá acreditar previamente ante la DIAN, el pago de las correspondientes regalías*". Este decreto es fiscalizado por la Unidad de Información y Análisis Financiero (UIAF), mediante solicitudes a la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), la ANM y la Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales (DIAN). Considerado lo anterior, si un agente que participa de la comercialización no cumple con esta certificación o inscripción en el RUCOM será detenido y por ende el mineral decomisado por las autoridades.

Dentro del marco para la comercialización de oro, las obligaciones y penalidades impuestas a través del RUCOM suponen un avance importante en el conocimiento de la trazabilidad de cada onza producida y un control sobre los grupos al margen de la ley que participan de la cadena del oro, no obstante, existen algunas limitaciones de esta herramienta y del sector legal minero actual. A continuación, se nombran y se describen brevemente estas:

- 1. La calidad de la información que reposa en el RUCOM es precaria [29]:** aunque la información que reposa en esta plataforma es extensa, la ausencia de labores de fiscalización y una definición final para los límites de producción que, permitan cruzar la información registrada, los datos respecto a la validación cruzada aún no es fidedigna ya que no hay una seguridad acerca de la totalidad del oro reportado. Esta falta de confiabilidad en los datos es una de las razones por la cual el DANE realiza su propio procedimiento para el cálculo de la producción de oro en el país.
- 2. Las organizaciones al margen de la ley emplean los vacíos que otorga el RUCOM [29]:** Como se mencionó existen toques para la producción producto del barequeo, sin embargo, la diferencia real entre la producción extraída y este límite estaría siendo empleada por los grupos al margen de la ley para justificar producción ilegal de oro. De igual forma, dada la ausencia de una fiscalización

constante y al no existir topes para la minería pequeña ni la que se encuentra en procesos de formalización, se estarán empleando los registros del RUCOM para justificar producción de una mina que no se encuentra registrada, transformando el oro tipo B en tipo A.

3. **Los grupos al margen de la ley no solo participan de la producción, sino también de la comercialización [29]:** los grupos al margen de la ley no solo son propietarios directo o indirectamente de las operaciones, sino, que también están involucrados en la compra y venta de oro. Según investigaciones de la Fiscalía y el Ministerio de Defensa, los ingresos provenientes de la comercialización de oro puede ser tres veces superior a los ingresos generados por narcotráfico [29].
4. **Las comercializadoras juegan un rol importante como financiadoras de las operaciones mineras:** como toda actividad económica, las operaciones mineras demandan inversiones para personal y equipo. El acceso al sector financiero por parte de la pequeña y mediana minería no es fácil por la percepción del riesgo, aunque, actualmente exista la Ley 2177 del 30 de diciembre de 2021 que expide normas para que el sector minero colombiano acceda a los servicios del sistema financiero y asegurador Nacional [39], la bancarización y el acceso a créditos no ha sido posible. A pesar de ello, la pequeña y mediana minería se ve en muchas ocasiones beneficiada por la inversión de los comercializadores donde, no hay un cierto saber, en la mayoría de las ocasiones, del origen de estos fondos.
5. **La cantidad actuales de puntos de compra, entre otros, correspondería a organizaciones al margen de la ley:** como se mencionó en secciones anteriores, es muy probable que existan sitios de compra que no estén registrados en el RUCOM y que obedezcan a la intervención de grupos al margen de la ley. Por los estudios realizados por EConcept, se halla que el transporte por parte de los pequeños productores es un reto, ya que, estos lugares se pueden encontrar bastante alejados y hay un riesgo latente de seguridad por el valor de la carga transportada. Dada esta situación, se encuentra la dispersión de sitios disponibles para llevar a cabo la actividad, además, de que participan desde pequeños productores hasta la gran minería, donde existen compradores locales hasta grandes comercializadores alojados en ciudades principales que realizan el

proceso de comercialización fuera del país como se ilustra en la figura 5 (Los productores de mediana escala llevan su producción a los compradores de los grandes centros urbanos o van directamente a un comercializador internacional. Mientras que, los productores de gran escala exportan directamente el oro que producen [29]).

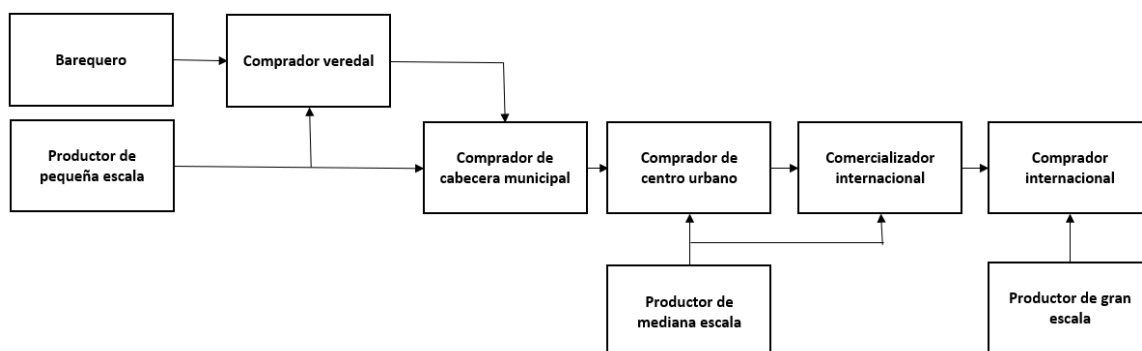


Figura 5. Esquema de comercialización interna de oro [29].

La existencia de este tipo de comercializadores tiene sus consecuencias respecto al precio de compra ofrecido a los productores o comercializadores. Los grandes productores tienen acceso a los mercados internacionales por lo que pueden convenir a un porcentaje cercano a la totalidad del precio internacional de la onza, mientras que en los datos recopilados por EConcept en 2019, los comercializadores de los centros urbanos realizarían un descuento del 10% respecto al precio final ofrecido por las comercializadoras internacionales [29]. Este porcentaje de descuento es proporcional al número de intermediarios que participen de la comercialización, además, dadas la permeabilidad en temas de fiscalización y partiendo de que se puede producir oro tipo B, los descuentos sobre este serían mayores en aras de cubrir su ilegalidad en un centro de compra autorizado [29]. Por ejemplo, si tomamos como referencia el valor de la onza del 1 de junio de 2023, es apreciable que al cierre de este día, la onza de oro se cotizó a 1974.35 USD [40], y acorde con los descuentos presentados, el comprador internacional accederá al precio completo de la misma, mientras que, el comercializador internacional obtendrá algún mínimo descuento que, para flexibilidad de este ejercicio será del 10 %, por lo que su onza será comprada a 1776.92 USD, en este mismo sentido, el comprador del centro urbano, obtendrá 1579.48USD por onza,

aplicándose un descuento del 15%, de esta forma continuará disminuyendo el precio de la onza de acuerdo con el número de intermediarios y así el comprador veredal accederá aproximadamente a un 70% del precio de la onza, o sea, 1382.05 USD. Esta cantidad pues disminuir dadas las condiciones particulares de la venta y compra, además, de las condiciones de mercado y el tipo de oro como ya se mencionó. La **Figura 6** describe los descuentos identificados a través de la cadena de compra.

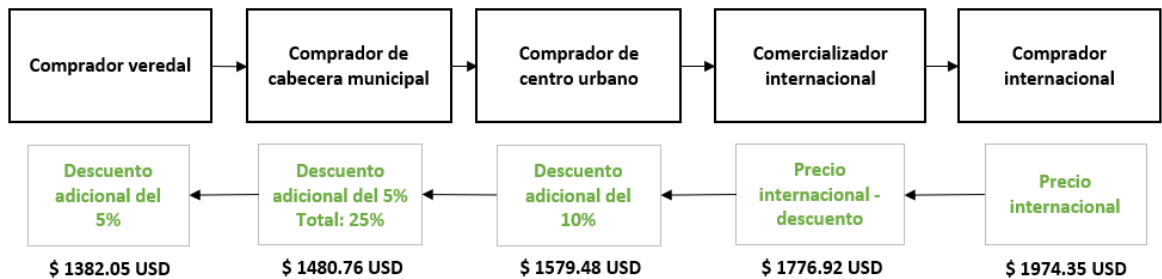


Figura 6. Descuentos identificados a través de la cadena de comercialización [29].

2.4 Incertidumbres de los proyectos mineros, modelos de valoración económica y financieros y metodologías de valorización empleadas en minería y sus características

De acuerdo con el panorama nacional e internacional del oro, la normativa legal y comercial para la compra y venta de minerales en el país descritos en las secciones 2.1, 2.2 y 2.3, es necesario ahondar en los riesgos e incertidumbres que afectan las variables operativas y estratégicas de los proyectos mineros desde su inversión inicial hasta los procesos de producción, compra y venta, ya que para la toma de decisiones, sobre todo en cualquier evaluación económica y financiera la incertidumbre es un factor inherente. Además, definir que es un modelo económico y financiero y su relación con los métodos para la valoración de proyectos bajo incertidumbre que permiten a las empresas la flexibilidad para la toma

de decisiones ya que en el caso de la minería las inversiones son secuenciales y una fase depende de la otra, aunque sus egresos sean independientes y evaluables por aparte [41]. A continuación, se describirán las temáticas mencionadas.

2.4.1 Riesgos y tipos de incertidumbres en la minería

Existen diferentes tipos de incertidumbres y riesgos técnicos y estratégicos que afectan a los proyectos y operaciones mineras, estos abarcan problemas relacionados con los recursos hídricos (accidentes ambientales, derrame o filtraciones de desechos) que, amenazan la calidad, la cantidad y disponibilidad de estos; el tipo de mina y ubicación geográfica, la disponibilidad, distribución jurídica y uso de las tierras; la disponibilidad de la mano de obra; demanda y ofertas en los mercados; la estabilidad jurídica e institucional; al igual que la innovación y tecnología, entre otros [42]. El riesgo es la probabilidad de que suceda un evento desfavorable [43] y en minería es posible encontrar dos tipos de riesgos. Los riesgos estratégicos son aquellos que miden el riesgo empresarial y que permiten preparar planes de acción para satisfacer las necesidades a corto y largo plazo, mientras que los riesgos operativos pueden ser evitables y se producen como resultado de sistemas, personas y acontecimientos externos inadecuados o deficientes [42]. El análisis de estos riesgos permite la valoración de los proyectos mineros antes y durante las etapas de inversión, ya que la puesta en marcha de una mina puede tomar entre 5 y 15 años y una inversión aproximadamente de US\$ 500 millones [42].

Como bien se sabe, la minería es una actividad compleja, como negocio, busca extraer de la forma más rentable los minerales del subsuelo, lo que exige una constante evaluación de los riesgos mencionados. A estos, se encuentran ligadas diferentes tipos de incertidumbres que influyen en el valor de todo proyecto y operación minera. El riesgo, se encuentra ligado a las incertidumbres a través de eventos futuros, por lo que eliminarlo por completo es imposible [43]. Una incertidumbre puede definirse como un evento o condición incierta que, en caso de producirse, puede tener un efecto positivo o negativo en uno o más objetivos de un proyecto [44]. Entonces, el valor de los proyectos mineros estará determinado por la calidad (ley) y cantidad del mineral de obtenido, las reservas evaluadas, los precios del mercado, la TRM, los costos operativos y las obligaciones jurídicas,

además, de la identificación y tratamiento de las incertidumbres asociadas a estas variables, puesto que, varias de ellas están asociadas a procesos estocásticos [41], los cuales se han tratado de medir a través de modelos que se aproximen a su comportamiento real y probabilístico. Las incertidumbres se pueden clasificar de acuerdo con su fuente de origen y su comportamiento, de acuerdo con lo anterior, se clasifican como incertidumbres endógenas y exógenas.

La incertidumbre interna o endógena es aquella asociada a la operación del proyecto en sí. En cambio, la externa o exógena se refiere a que sus fuentes provienen del exterior de las operaciones de las empresas [5]. Ross menciona que la característica principal de la incertidumbre endógena es que no se encuentra ligada a la volatilidad y puede reducirse mediante el aprendizaje activo, mientras que la exógena, está sujeta a una volatilidad que varía de manera impredecible y sus valores futuros no pueden resolverse hasta que llega el futuro [45]. En las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y

Tabla 3 se enuncian las principales fuentes de incertidumbre endógenas y exógenas.

Tipo	Incertidumbres más comunes
Geológica	Distribución de las leyes, tonelaje de las reservas, continuidad de las unidades geológicas, variabilidad del índice de Bond
Geotécnica	Derrumbes colapso de rocas, estallido de rocas, falla en las paredes de la mina
Metalúrgica	Recuperación (%), tiempo de procesamiento (Cinemática), calidad del producto final
Operacionales	Disponibilidad mecánica de equipos, disponibilidad de recursos humanos, falla en infraestructura, variabilidad de la mezcla a planta, disponibilidad de insumos, condiciones climáticas
Proyectos	Capacidad de extracción, capacidad de procesamiento
Organizacionales	Huelgas

Tabla 2. Fuentes de incertidumbre endógena tomado de Urieta Gómez [7].

Incertidumbres más comunes	
Mercado	Precio del commodity, precio de subproductos, tasa de cambio, precio de la energía y otros servicios
Financiera	Disponibilidad de recursos financieros, tasa de interés
Política	Expropiación de recursos, estabilidad gubernamental, cambio de tasas de impuestos y/o regalías, cambio de leyes laborales
Sociales	Demandas de la comunidad, estabilidad social
Ambientales	Cambios en las regulaciones, permisos ambientales
Industriales	Guerra de precios, producción de los otros productores, confiabilidad de los proveedores, ingreso de nuevos productores, poder de mercado de los clientes, sustitución
Tecnológicos	Mejoramiento de la tecnología actual, capacidad de tratamiento de nuevo mineral

Tabla 3. Fuentes de incertidumbre exógena tomado de Urieta Gómez [7].

2.4.2 ¿Qué es un modelo de evaluación económica y financiera?

En primera instancia un modelo puede definirse como una simplificación de la realidad a partir de una teoría que por medio del lenguaje matemático facilita la representación de los procesos, evolución y resultados, en un ambiente de recursos escasos o dispersos, por ejemplo, en los que la observación directa no es posible, por costos, tiempo o dilemas éticos. [46]. El propósito de construir modelos es simular procesos a partir de información recolectada para evaluar unos posibles resultados, este proceso de evaluación es donde se definen, sistematizan y procesan situaciones, datos e información, con la finalidad de determinar la factibilidad de un proyecto en función de uno o varios escenarios determinados [47]. La información recolectada para los procesos de simulación y evaluación se toma de las mejores fuentes posibles, agrupada en dimensiones de tiempo y de los procedimientos utilizados [46].

La economía se define la ciencia que se encarga de estudiar las decisiones que toman las personas frente a problemas derivados de la escasez [48] y por otro lado las finanzas es la rama de esta ciencia que estudia la manera en la que los recursos escasos se asignan a través del tiempo [49]. Por lo anterior, se han buscado desarrollar herramientas eficientes para la toma de decisiones en aras de asignar eficientemente los recursos en condiciones de incertidumbre. De este modo, un modelo de evaluación económica y financiera es una representación esquemática para simular y evaluar mediante cálculos matemáticos, la rentabilidad y viabilidad financiera de una inversión o proyecto o en el mercado, por lo que, su resultado final es medir la factibilidad contemplando el valor del dinero a través del tiempo para calcular la eficiencia de la inversión total involucrada, su probable rendimiento durante su vida útil de acuerdo con diferentes escenarios y promover la toma de decisiones adecuadas de acuerdo con los objetivos económicos para la administración eficiente de los recursos [47], [50].

La respuesta de los modelos de evaluación económica y financiera respecto a las simulaciones realizadas será la mejor estimación posible de acuerdo con la calidad de la información recolectada. Los datos suministrados a los modelos pueden provenir de diferentes fuentes, estos reciben el nombre de inputs e influyen en las variables dependientes e independientes más relevantes. De la misma manera como los datos pueden provenir de diferentes recursos, los modelos pueden emplear diferentes metodologías de valoración, el uso de una o varias de ellas depende de las necesidades y la naturaleza de los datos, es decir, si presentan una esencia determinista o por lo contrario poseen un comportamiento probabilístico relacionado con las incertidumbres. En las siguientes secciones se analizará el valor financiero de los proyectos y las metodologías para la valoración económica y financiera de acuerdo con los métodos tradicionales y los métodos alternativos que permiten la inclusión del comportamiento estocástico de los datos y el manejo de las incertidumbres.

2.4.3 Valor financiero de los proyectos y el manejo de incertidumbres

El valor financiero de un proyecto puede tomarse como el valor con el cual puede transarse un bien o servicio en el mercado [51]. Las variables que influyen sobre los modelos que determinan el valor financiero presentan variaciones en un periodo de tiempo, como ya se ha mencionado, un ejemplo de este tipo de comportamiento es el precio en el mercado de los commodities, el cual tiene un comportamiento volátil en su lapso cronológico y que depende algunos factores como la incertidumbre estructural de los mercados [52], la existencia de productos sustitutos, mejoras o cambios en las tecnologías de producción [53], la especulación del mercado [54] y la relación con procesos macroeconómicos como mencionan Chen y otros autores en sus estudios [54]–[59]. Tradicionalmente, el valor de las empresas se mide a partir de los datos incluidos en las cuentas oficiales y otras informaciones financieras, aunque, actualmente, respecto a incertidumbres tecnológicas, la innovación y transformación del sector, la tecnología digital ha adquirido un impacto significativo en el sector, dado que las compañías buscan en las nuevas tecnologías soportar sus esfuerzos para mejorar su productividad y sus márgenes a lo largo de la cadena de valor. Se adquiere consciencia sobre el poder de los datos como activo, para mejorar la confianza, y para introducir capacidades predictivas [28]. Sin embargo, si se partiera solo de información financiera como las provisiones, estas no proporcionarían información completa ya que no proporcionan información acerca de las externalidades [60].

Dado que en la toma de decisiones existen riesgos e incertidumbres, es necesario la inclusión de estos en los modelos de evaluación para hallar el valor financiero, puesto que tanto las variables internas y externas pueden afectar el cumplimiento de los objetivos y subestimar o sobreestimar el valor. La incertidumbre se encuentra presente desde la naturaleza de los datos y el planteamiento del modelo [46], el manejo de esta se realiza a través de una metodología que permita la integración de los componentes del valor que toma una variable a lo largo del tiempo por medio de un ajuste de distribución de probabilidades, tomando como referencia parámetros estadísticos como la desviación estándar y la media [43]. El manejo de las incertidumbres, son acciones necesarias para la protección, aseguramiento y mitigación de los efectos positivos o negativos por la ocurrencia de estas [43]. Por esta razón, en los últimos años se han desarrollado

metodologías de valoración más flexibles que permitan la inclusión de los riesgos e incertidumbres.

Las metodologías para la valoración de proyectos mineros son variadas y su aplicación se basa en el tipo y la cantidad de incertidumbres bajo las cuales los modelos puedan ser evaluados. El valor financiero de los proyectos también es el resultado de la flexibilidad disponible en el sistema respecto a las incertidumbres que se desarrollan [59].

Existen diferentes formas de calcular el valor de un proyecto minero, como se indicó, las metodologías son variadas y se clasifican de acuerdo con su naturaleza metodológica. Los métodos tradicionales son de gran aplicación cuando se requiere de una valoración determinista, sin embargo, en ellos se supone que no hay flexibilidad. No obstante, existen alternativas a las metodologías tradicionales que, permiten la incorporación del riesgo, las incertidumbres, la flexibilidad administrativa y diversas formas de cálculo del costo de capital que resultan del análisis de la tasa de descuento de los flujos de caja [7]. En la siguiente sección, se revisarán las metodologías tradicionales y las alternativas para la valoración de proyectos bajo incertidumbre.

2.4.4 Metodologías tradicionales para la valoración de proyectos

Las metodologías para la valoración de proyectos varían de acuerdo con la naturaleza de sus metodologías y su capacidad para integrar variables asociadas a incertidumbres. Normalmente, las metodologías tradicionales para la valoración de proyectos son estrategias empleadas para evaluaciones determinísticas. Brindan resultados confiables cuando las opciones de flexibilidad no están disponibles [8]. También, aportan una considerable confiabilidad cuando el proyecto cuenta con una incertidumbre limitada y los flujos de efectivo son bastante constantes, no obstante, cuando hay variabilidad en los parámetros se muestran grandes inconsistencias y no logran valorar en forma exacta las oportunidades que presenta una alternativa de inversión [8], [61]. Los métodos tradicionales asumen que todas las variables relacionadas son fijas sin considerar su realidad estocástica, entre estas se encuentran los ingresos, costos y la tasa de producción, además, de algunos que están asociados a la explotación minera sin llevar a

cabo una profundización en ellos. Otra limitación es que se asume que las inversiones deben tomarse “ahora o nunca”, dejando de lado el valor de la estrategia y la gestión [62]. Y, por último, los métodos tradicionales tienden a llevar todas las fuentes de riesgo a una sola tasa de descuento. Debido a lo anterior, estas metodologías tienden a infravalorar los proyectos mineros durante sus últimos años, como menciona Martínez [63]. A continuación, se describen algunas metodologías tradicionales para la valoración de proyectos y el indicador financiero TIR.

Flujo de Caja Descontado (FCD): Dentro de las metodologías tradicionales, se encuentra el Flujo de Caja Descontado (FDC), el cual asume un enfoque determinístico que toma en cuenta un solo grupo de variables de entrada, y a su vez toma una trayectoria fija de los resultados del proyecto sin considerar ninguna flexibilidad para la toma de decisiones [61]. Basa su metodología en la proyección de flujos de caja libre de una inversión o empresa descontándolos a una tasa que refleje el coste del capital aportado [64], [65].

Valor Presente Neto (VPN): Es un enfoque de flujo de efectivo descontado en un periodo de tiempo a una tasa de interés que puede ser el Costo del Capital fijado por el inversionista, o a una tasa alternativa (WACC) o tasa libre de riesgo [7]. El VPN de una propuesta de inversión es el valor presente de los flujos efectivos netos de la propuesta, menos su inversión inicial [66]. Como valores de referencia del VPN, si toma un valor positivo, significa que aumenta la riqueza del activo o proyecto porque estos valen más de lo que cuesta o agrega valor al inversionista, mientras que un VPN menor que cero, reduce la riqueza de un activo o proyecto porque cuestan más de lo que vale y representa pérdida de valor y, por último, si es igual a cero, no se agrega valor ninguno [66], [67]. El cálculo VPN queda determinado por la ecuación 1 [68], [69]:

$$VPN_i = \sum_{t=1}^n \frac{FCN_t}{(1+i)^t} - I_o \quad (1)$$

Donde:

FCN: Flujo de caja en los periodos de tiempo del proyecto.

i: Tasa de interés o costo capital

I_o= Valor de la inversión inicial

t= número de periodos del proyecto.

Desde el punto de vista minero, los flujos de caja por año dependen de varios factores, tanto operativos como de mercado. Los flujos de efectivo discriminan entre costos e ingresos de minería y planta. La existencia de un proceso de transformación de los minerales provenientes de la mina mediante varios procesos metalúrgicos es el valor agregado que va a proporcionar beneficios de acuerdo con la calidad del producto final [70]. Es importante mencionar que como se aprecia en la ecuación 1, las variables empleadas para el cálculo del VPN pueden ser fijas, además, de no considerar posibles escenarios de inversiones futuras, sin embargo, el VPN puede tener un enfoque probabilístico de acuerdo con su aplicación y que las metodologías para la valoración de proyectos bajo incertidumbre pueden ser un complemento a las brechas que tienen las metodologías tradicionales, aquí es importante resaltar entonces la aplicación de algunos autores como la investigación Franco Sepúlveda, Campuzano y Pineda [70]. En su estudio el VPN se toma como una variable confiable estocástica, analizada a través de un planeamiento minero, pues se tiene en cuenta la incertidumbre para que las variables de entrada la afecten, y según sus conclusiones, para el caso de los grandes proyectos mineros de oro a cielo abierto el precio del metal en el mercado es el parámetro de mayor influencia en la VPN, continuando con la ley del mineral y la recuperación metalúrgica en tercer lugar [70]. En la aplicación del presente trabajo se denotaran ambos enfoques del VPN para contrastar lo mencionado.

Tasa interna de retorno (TIR): Es un indicador financiero que mide el rendimiento esperado de un proyecto de presupuesto de capital. Es la tasa de descuento que hace que el valor presente total de todos los flujos de efectivo esperados de un proyecto sume cero [66]. Es de entenderse que la inversión inicial es el primer egreso que se identifica de un proyecto y que este es aceptable si la TIR es mayor a la tasa de descuento requerida por el inversor [67], [69], [71].

2.4.5 Metodologías para la valoración de proyectos bajo incertidumbre

La flexibilidad se entiende como la capacidad para modificar decisiones estratégicas tomadas inicialmente de aspectos como atrasar, abandonar, expandir o llevar a cabo una inversión [61]. Las dinámicas globales de mercado, sociales, ambientales, tecnológicas y de los depósitos minerales conllevan a una mayor incertidumbre, por ende, la flexibilidad se ha tornado como una ventaja para tomar decisiones favorables en el ámbito minero. Debido a la naturaleza de las metodologías determinísticas y sus herramientas poco robustas para la inclusión y análisis de riesgos e incertidumbres que permitan una flexibilidad y una adecuada toma de decisiones, varios investigadores han dedicado sus esfuerzos en dar solución a las falencias de estas metodologías y plantear alternativas de evaluación que permitan proporcionar mayor confiabilidad a los procesos de valoración de proyectos. Es así como en esta sección, se analizarán los conceptos de opciones financieras, valoración de opciones financieras, el método de valoración de opciones reales (VOR) y los modelos de valoración de opciones reales.

2.4.6.1 Opciones financieras

Una opción financiera se define como el derecho (prima) de comprar y vender una cantidad fija de un activo, este procedimiento se define mediante un contrato y se proporciona el derecho mencionado a un precio (precio del ejercicio) y una fecha determinada (vencimiento) [5]. El valor depende del precio de otro activo denominado activo subyacente. El tipo de opciones financieras se divide en opción de compra (Call) o de venta (put).

La opción de compra (call), el derecho (prima) es adquirido por el comprador al comprar el activo subyacente a un precio y tiempo determinado. El call se pondrá en marcha, bajo la condición de que el precio del activo subyacente en el mercado sea mayor que el precio pactado, si esto no es así, el comprador perderá únicamente la prima. De este modo, mientras más alto sea el precio del activo subyacente en el mercado respecto al precio del ejercicio, mayor será la ganancia [5].

En la otra opción financiera (put), es un derecho a vender un activo determinado (subyacente) a una fecha determinada (vencimiento) a un precio fijado, por lo que se pagará una cantidad (prima) determinada [72]. Este derecho a vender se llevará a cabo siempre y cuando el precio del activo subyacente en el mercado sea menor que el precio pactado; de no cumplirse esta condición, el comprador perderá solamente la prima. De acuerdo con lo anterior, cuanto menor sea el precio del activo subyacente en el mercado con respecto al precio del ejercicio, mayor será la ganancia [5].

2.4.6.2 Opciones reales

Myers en 1977 [73], mediante un estudio teórico de las políticas de deuda corporativa, acuñó el término de “Opciones reales” donde clasificó los activos corporativos en 2 clases: activos existentes y opciones reales. El segundo activo corporativo se entendía como oportunidades de mejora, las cuales son valiosas fuentes de flexibilidad gerencial producto de las capacidades y competencias centrales de las empresas [74], [75]. Introducido este nuevo paradigma de evaluación para tomar decisiones, las opciones reales se enuncian como una aplicación de los principios de opciones financieras empleadas para proyectos o para valoraciones de empresas [5]. Al igual que una opción financiera, una opción real es un derecho, mas no una obligación, de realizar una iniciativa comercial, en o dentro de un periodo de tiempo y la cual se encuentra conectada con activos reales o dentro de activos reales [8], [76]. Al asemejarse a las opciones financieras, parte de la premisa de que los proyectos de inversión pueden asemejarse a las opciones financieras (call y put) y no a una cartera de bonos sin riesgo como el VPN, el cual deja de ser útil y estático cuando se exhiben situaciones en las que no necesariamente el proyecto tiene que ejecutarse de forma rápida o inmediata, es decir, cumplirse más adelante o por partes [77], como se mencionó en las características de las metodologías tradicionales. La diferencia primordial entre las opciones reales y las opciones financieras es que las primeras se relacionan con activos inciertos tangibles, como una mina, planta de beneficio o una unidad productiva, mientras que las opciones financieras aplican a activos financieros subyacentes como acciones, bonos o divisas [8], [61]. Según Gómez [78], el análisis mediante opciones reales es fundamental cuando:

- Hay decisiones de inversión contingentes. Enfoques de otro tipo no pueden valorar acertadamente las oportunidades.
- La incertidumbre es bastante extensa y se torna sensible para esperar más información, impidiendo arrepentirse de inversiones irreversibles.
- El valor está destinado para posibilidades futuras en vez de flujos de efectivo actuales.
- Cuando el efecto de la incertidumbre es fuerte y solo mediante las opciones reales se puede determinar la flexibilidad.
- Exista actualización de proyectos y correcciones de metodologías y estrategias durante el trayecto.

Las inversiones dentro del campo minero son onerosas y en muchas ocasiones sin retorno y deben analizarse las incertidumbres presentes y las circunstancias especiales que las opciones reales pueden encontrar [79]. De acuerdo con estas necesidades, el análisis y la valoración de opciones reales ha tenido una fuerte influencia para utilización de modelos más confiables para la valoración de proyectos de inversión que involucren inversiones de alto riesgo. El análisis de opciones reales (AOR) se refiere a tener un panorama del mundo basada en opciones o alternativas, mientras que la valoración de opciones reales (VOR) comprende el uso de las metodologías disponibles para la evaluación de inversiones reales. Aunque los dos términos se refieren a operaciones diferentes, en la literatura es común que se empleen ambos de forma indistinta.

Dentro del ámbito minero las opciones reales han sido tomadas como una nueva práctica que permite incorporar la flexibilidad mediante la evaluación, evolución, administración y toma de decisiones a partir de los resultados de analizar variables que tienen una variabilidad en el tiempo (precio de los metales, tasas de cambio, recuperación, capacidad de procesamiento entre otros), además, de generar expectativas favorables para aprovechar oportunidades estratégicas y a la vez proteger las inversiones y los proyectos de los riesgos [80]. Los factores que inciden en una opción real difieren a aquellos que afectan una opción financiera, en la **Tabla 4** se enuncian los factores que influyen en cada una del tipo de opciones.

Opción real	Opción financiera
Valor esperado de los flujos	Precio de la acción
Costo de la inversión	Precio del ejercicio
Tasa de descuento con riesgo (Incorpora el riesgo del activo)	Interés sin riesgo
Volatilidad de los flujos esperados	Volatilidad
Tiempo hasta el ejercicio	Tiempo hasta el ejercicio
Mantenimiento de la opción	Dividendos
Su valor depende de la revalorización esperada del subyacente	Su valor no depende de la revalorización esperada del subyacente
El ejercicio de la opción no sucede, es un instante	El ejercicio de la opción es instantáneo

Tabla 4. Parámetros que influyen en el valor de una opción financiera y una opción real [81].

Según Gómez [78], el análisis mediante opciones reales es fundamental cuando:

- Hay decisiones de inversión contingentes. Enfoques de otro tipo no pueden valorar acertadamente las oportunidades.
- La incertidumbre es bastante extensa y se torna sensible para esperar más información, impidiendo arrepentirse de inversiones irreversibles.
- El valor está destinado para posibilidades futuras en vez de flujos de efectivo actuales.
- Cuando el efecto de la incertidumbre es fuerte y solo mediante las opciones reales se puede determinar la flexibilidad.
- Exista actualización de proyectos y correcciones de metodologías y estrategias durante el trayecto.

Categorícamente la aplicación de las opciones reales en inversiones mineras se divide a la aplicación de opciones reales “en proyectos” y “sobre proyectos”. Sen la siguiente sección se describen estas aplicaciones de las opciones reales.

2.4.6.3 Opciones reales “en proyectos” y opciones reales “sobre proyectos”

El análisis mediante opciones reales no solo se limita al análisis del mercado o factores externos que afectan los proyectos, sino también, a circunstancias técnicas, tecnológicas y de ingeniería. El concepto de opciones reales “en proyectos” es aplicado a las alternativas de cambio del sistema técnico que se esté implementando actualmente, es decir, sobre las incertidumbres técnicas y tecnológicas [82]. Es la estrategia gerencial para el manejo de la flexibilidad desde la gestión industrial y la producción y de esta forma responder a las incertidumbres. Por otro lado, las opciones reales “sobre proyectos”, se refiere al análisis de las condiciones externas que actúan sobre los proyectos [82], y la flexibilidad asociada a la toma de decisiones, respecto a retrasar decisiones o proponer estrategias para agregar valor durante la planificación del proyecto.

2.4.6.4 Tipos de opciones reales

- **Opción de crecimiento**

La aplicación de esta opción depende de los análisis y posibles los beneficios que pueda traer consigo la inclusión de inversiones adicionales y discretionales que se encuentran asociadas al momento de vida del proyecto. De acuerdo con lo anterior, se le relaciona como una opción americana ya que dependerá de cuando las circunstancias sean favorables [5].

La opción de crecimiento contempla aumentar la capacidad de tratamiento y/o producción, contratar mayor personal operativo, ingresar a nuevos mercados, la introducción de nuevos productos, adquirir otras empresas, invertir en programas de investigación y desarrollo (I + D), entre otros [5], [83]. Según Mascareñas [84], la implementación de esta opción es útil para: adquisición de tipo estratégico (consecuencia del buen comportamiento actual, se puede emplear para incrementar producción), investigación y desarrollo (siempre y cuando la empresa cuente con flujos que permitan financiar proyectos de I + D para nuevas oportunidades), y proyectos multietapas (seguros que apoyen y respalden algunas operaciones ante situaciones adversas que puedan generar pérdidas a las empresas).

- **Opción de diferir**

Es una opción interesante porque permite la inversión en escenarios prósperos y esperar en los tiempos de escasez. Les permite a las gerencias la administración de los recursos y no realizar apuestas e inversiones cuando hay una alta incertidumbre.

El empleo de esta opción se asemeja al uso de un call que, conlleva el derecho de comprar un activo realizando el pago previsto de acuerdo con el contrato. En este caso invertir se asemeja a la adquisición del activo subyacente que es el flujo de fondos que se espera atraer con la inversión (precio spot) y el monto de esta se considera como el precio para apropiarse de ese flujo de fondos (precio del ejercicio o strike). Dado lo anterior, si es posible esperar, es mejor, ya que será posible observar, esperar y evaluar el comportamiento de las variables aleatorias [5], [78]. La opción de diferir puede traer consigo costos onerosos a través del tiempo puesto que las consecuencias positivas de las inversiones se encuentran en función de las oportunidades, el mercado y la competencia, por lo que no invertir en el tiempo correcto puede traer decaimiento de los flujos esperados, por lo que la opción de diferir es más aplicable para las empresas que tienen exclusividad proyectos porque solo ellas pueden ejecutarlo [5].

- **Opción de abandonar**

De acuerdo con algunas características de los proyectos (ubicación, uso de tecnologías y/o posible liquidación en cualquier momento por un valor mayor) las empresas deciden tomar la venta de estos como una posibilidad, en vista de que tal vez continuar con las operaciones no tenga tanto valor como su posible venta. Comprende una decisión financiera que tomará sentido cuando el proyecto no tenga una justificación económica, es decir, no es rentable o el margen de renta ejecutado no es el esperado por los inversionistas. No obstante, la venta o liquidación no es una tarea sencilla ya que tiene unos flujos de caja inciertos al igual que su valor residual [78].

El valor total de los proyectos debe considerar el valor de abandono, el cual se conoce mediante su evolución en el futuro. La decisión de abandono depende de las circunstancias en que se encuentre el proyecto, por ende, el valor del proyecto son los flujos de caja más el valor de la opción de venta. Cuando el valor presente es inferior al valor de liquidación,

es conveniente proceder con el proceso de venta. En minería, esta opción puede tomarse cuando los costos fijos y los variables son superiores a los del activo, cuando el precio del activo disminuye tanto que no alcanza a cubrir los costos fijos, cuando la ley del mineral explotable se encuentra por debajo del tenor de corte y/o el calor esperado por los inversionistas [5]. En la **Tabla 5** se realiza un resumen de los tipos de opciones reales y sus principales características.

Tipo de opción real	Descripción
Opción de crecimiento	Consiste en expandir y/o aumentar las operaciones cuando las condiciones sean favorables. Este procedimiento puede realizarse en uno o varios periodos.
Opción de abandonar	Desinvertir cuando el proyecto no se justifica económicamente
Opción de diferir	Esperar un tiempo determinado a que evolucionen satisfactoriamente algunas condiciones de mercado (especialmente el precio del commodity) para iniciar un proyecto de inversión. Se justifica como una opción de compra en un tiempo determinado sobre una inversión o un proyecto.

Tabla 5. Tipo de opciones reales [77].

2.4.6.5 Valoración de opciones reales

Para realizar una valoración de opciones reales (VOR) se emplean metodologías para la valoración de opciones financieras, y se usan modificaciones a las mismas porque en la mayoría de los procedimientos de VOR no se forma una cartera equivalente que, es la base para la valoración de opciones financieras [5].

En primera instancia la VOR fue desarrollada para la fijación de precios de opciones financieras y los modelos notables estructurados para la valoración de opciones financieras que incluyen la reconocida fórmula de fijación de precios desarrollada por Fischer Black y Myron Scholes en 1973 [85] y la metodología de opciones binomiales de John Cox et al [86]. Por otro lado, para la evaluación de opciones reales, Boyle en 1977 [87] empleó por primera vez la VOR usando simulaciones para la fijación de precios de opciones. Luego de ello, a lo largo de las últimas décadas, varias investigaciones han

destinado sus esfuerzos en desarrollar nuevos modelos y metodologías que permitan realizar mejoras en la utilización de las metodologías ya desarrolladas para la evaluación de proyectos e inversiones bajo el análisis de las incertidumbres. No obstante, la VOR presenta algunas limitaciones, las cuales se presentan a continuación [88]:

- Las negociaciones del activo subyacente no se llevan a cabo en un mercado público organizado, ya que las opciones reales les sirven a las altas directivas de un sector y empresa determinados para la toma de decisiones acertadas respecto a una inversión.
- El precio del activo subyacente no tiene un comportamiento continuo, aunque para unas metodologías de VOR si tiene esa conducta (modelos de Black – Scholes y binomial), no obstante, estos no tienen necesariamente esta actuación, razón por la cual infravaloran el valor de las opciones fuera de dinero.
- Dado que el ejercicio de la opción depende del tiempo que tome su etapa de desarrollo, la opción no se realiza inmediatamente. Como se mencionó la valoración de opciones financieras parte de una cartera réplica con flujos idénticos a los de la opción, lo cual, no es razonable para una VOR.
- La VOR implica una mayor complejidad operativa ya que puede que exista una deficiencia en la existencia de información proveniente del mercado que permita realizar el cálculo de la volatilidad histórica del activo subyacente. Lo anterior es sumamente complejo para las empresas que no cotizan en bolsa, aunque, pueden proceder obteniendo información de empresas similares respecto al valor del activo o sus rentabilidades.

Existen tres metodologías para la resolución de VOR: (i) ecuaciones diferenciales parciales, (ii) modelos binomiales, que incluyen árboles de decisión, y (iii) modelos de simulación, donde la más empleada y reconocida es la simulación Monte Carlo.

2.4.6.6 Ecuaciones diferenciales parciales (EDP)

Este tipo de metodología para la resolución de VOR implica las soluciones analíticas, numéricas y de diferencias finitas [8]. La resolución implica identificar y definir unas condiciones frontera específicas que describen los cambios en el valor de la opción respecto a unos variables independientes como las pueden ser las de mercado, es decir, el núcleo de la resolución de este método es que iguala el cambio en el valor de la opción al cambio en el valor de la cartera financiera de referencia [89].

La formulación de las EDP depende del número de variables independientes que estén asociadas al valor de la opción, por ende, en ocasiones la solución de estas es compleja y es posible que no se encuentre una solución cerrada y se empleen aproximaciones para obtener una ecuación analítica. La solución mediante EPD se vuelve extremadamente compleja cuando existen más de 3 variables de estado. Las aproximaciones a las soluciones se logran mediante análisis computacionales complejos y las condiciones requeridas no son realmente aplicables, pues son contextos ideales, Bjerksund y Ekern que no existen soluciones analíticas para opciones reales en proyectos e interacciones de opciones [90]. No obstante, este método es bastante aplicado a pesar de sus desventajas y gracias a las técnicas computacionales actuales. El modelo de EDP más reconocido es el de Black-Scholes [85].

- **Modelo de Black-Scholes**

Fue desarrollada por Fischer Black y Myron Scholes en 1973, en colaboración Robert Merton [91] y con ello suministraron herramientas que permitieran calcular el riesgo financiero. Es un modelo ampliamente empleado en el ámbito financiero puesto que permite obtener el valor de una opción. Trata básicamente de estimar el valor actual de una opción europea para la compra (*call*) o venta (*input*) de acciones en una fecha futura. En las ecuaciones 2 a 4, se describe el valor de una opción de compra:

$$C = [N(d_1) * P] - [N(d_2)Xe^{-rt}] \quad (2)$$

$$d_1 = \frac{\ln\left(\frac{P}{X}\right) + \left(r + \frac{v^2}{2}\right)t}{v\sqrt{t}} \quad (3)$$

$$d_2 = d_1 - v\sqrt{t} \quad (4)$$

Donde:

C: Precio de la opción de compra.

P: Precio de la acción

N(d₁): Función de densidad acumulada de una distribución normal de (d₁)

X: Valor actual del precio del ejercicio.

N(d₂): Función de densidad acumulada de una distribución normal de (d₂)

r: tasa libre de riesgo

t: tiempo hasta el vencimiento de la opción (en % del año)

v: volatilidad – desviación típica anualizada de la rentabilidad diaria.

2.4.6.7 Modelo binomial

El modelo binomial fue diseñado por Cox, Ross y Rubinstein en 1979 [86]. Se basa en operaciones matemáticas más sencillas, diagramas flexibles y fáciles de entender. Los diagramas se representan a través de mallas o árboles y personifican los valores que puede tomar el activo subyacente durante el tiempo de la opción, la representación gráfica se asemeja a un flujo de caja por lo que se obtiene una solución óptima al problema general optimizando las decisiones en los nodos o puntos de elección, para luego volver en forma recursiva hasta los puntos de decisión actuales [61]. Permite valorar tanto opciones americanas como europeas y autores como Hahn y Dyer, mencionan que el modelo binomial es capaz de valorar opciones donde las soluciones de forma cerrada no están disponibles y la posibilidad de ejercicio temprano de la opción [92].

Esta metodología para la VOR es flexible, sin embargo, el nivel de complejidad de los modelos aumenta exponencialmente con el número de incertidumbres consideradas, además, el tiempo para estructurar el modelo es mayor debido a que se necesita

subdividirlo en periodos más cortos y por ello el espectro de uso es limitado. El valor de la opción queda determinado por las ecuaciones 5 a 11.

$$C = \frac{1}{r} [p * Cu + (1 - p) * Cd] \quad (5)$$

Donde:

$$p = \frac{r-d}{u-d} \quad (6)$$

$$q = 1 - p \quad (7)$$

$$Cu = \text{Max}(0; uS - E) \quad (8)$$

$$Cd = \text{Max}(0; uS - E) \quad (9)$$

$$U = e^{\sigma \sqrt{\frac{\text{Vida útil del proyecto}}{\text{pasos}}}} \quad (10)$$

$$Cd = \frac{1}{u} \quad (11)$$

Donde:

C: Valor teórico de la opción Call

r: $(1 + r_f)$; donde r_f es la tasa libre de riesgo

u: Movimiento multiplicativo al alza del precio del activo subyacente, asociado a la probabilidad p

d: Movimiento multiplicativo a la baja del precio del activo subyacente, asociado a la probabilidad q

E: Precio del ejercicio

Cu: Valor de la opción Call con movimiento multiplicativo al alza

Cd: Valor de la opción Call con movimiento multiplicativo a la baja

uS: Evolución al alza del activo subyacente

Por otro lado, el Put queda determinado por las ecuaciones 12 a la 14

$$C = \frac{1}{r} [p * Cu + (1 - p) * Cd] \quad (12)$$

$$Pu = \text{Max}(0; E - uS) \quad (13)$$

$$Pd = \text{Max}(0; E - dS) \quad (14)$$

Donde:

P: Valor teórico de la opción Put

Pu: Valor de la opción Put con movimiento multiplicativo al alza

Pd: Valor de la opción Put con movimiento multiplicativo a la baja

dS: Evolución a la baja del activo subyacente

Dado que el modelo debe ser subdividido en periodos, el procedimiento para el cálculo de del valor de la opción es diferente para un periodo que, para varios, a continuación, se enuncia el procedimiento de acuerdo con Urieta Gómez [7]:

1. **En un periodo:** se realiza el procedimiento a partir de la ecuación 5 hasta la 14 para el cálculo de la opción call o put.
2. **En n periodos:** se realiza un procedimiento regresivo desde la ecuación 5 hasta la 14, y la primera opción que se determina se encuentra en el periodo n.

2.4.6.8 Simulación Montecarlo

Es una metodología para la VOR, en la cual se simulan grandes cantidades de trayectorias que el valor del activo subyacente puede tomar durante la vida de la opción, esta cifra oscila entre los límites definidos por el cono de incertidumbre descrito por la volatilidad del activo como se muestra en la figura 7. Entre las ventajas que ofrece la simulación Montecarlo es que permite el tratamiento de un sinnúmero de variables, puesto que las

herramientas ofimáticas diseñadas para la resolución de este tipo de simulaciones ofrecen resoluciones robustas, extensas y sofisticadas. Con base en lo anterior, permite modelar y mezclar diferentes incertidumbres, y las decisiones se toman a partir las trayectorias que se generan a partir de suposiciones de entrada utilizando un modelo matemático [5]. Entre las otras ventajas que ofrece este tipo de VOR es que permite tanto el tratamiento de opciones europeas como americanas y resolver problemas cuyas variables poseen comportamientos estocásticos, lo anterior, se logra mediante la simulación de datos usando distribuciones de probabilidad cuyos resultados se analizan estadísticamente obteniendo valores en términos de probabilidades.

Según Mendiola [5], para la aplicación del método se podrían revisar las siguientes fases:

1. A partir de los datos estadísticos disponibles, determinar la distribución de probabilidades de las variables asignadas.
2. Obtener una serie aleatoria para crear una serie de valores que posean las características de la distribución real que se desea simular.

Dentro de los estudios más destacados en el ámbito de esta metodología se encuentra la propuesta desarrollada por Longstaff y Schwartz en el año 2001 [93], la cual ha sido considerada como uno de los métodos más eficientes para VOR.

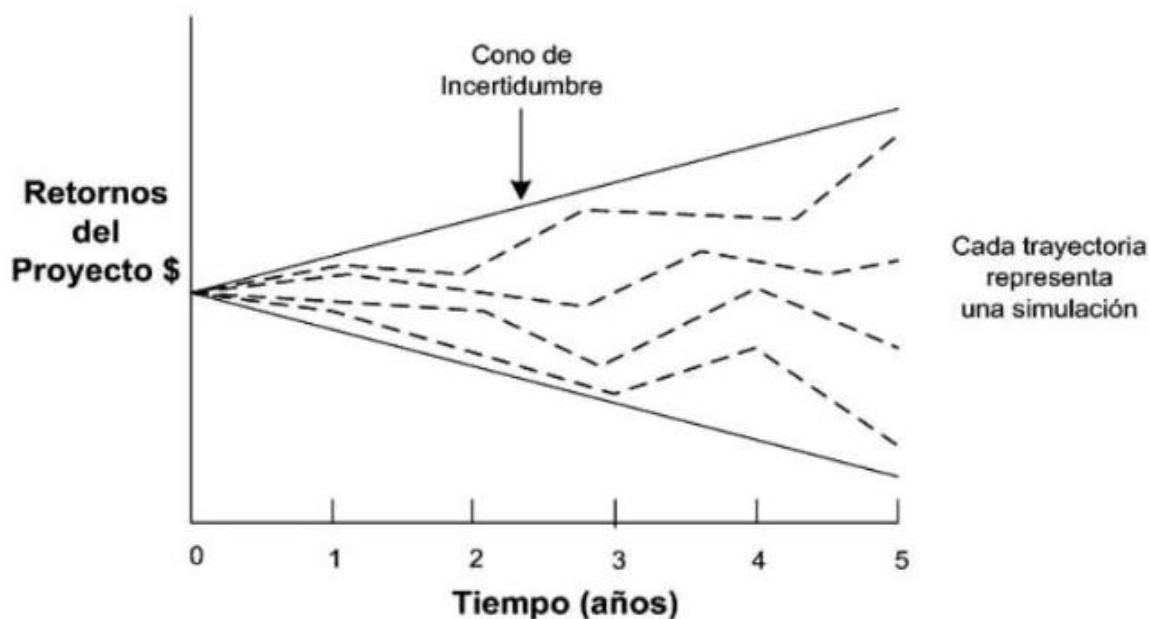


Figura 7. Simulación Montecarlo y cono de incertidumbre [61]

En la **Tabla 6**, se describen las metodologías de VOR y sus principales características.

Binomial	Black - Scholes	Simulación Montecarlo
Es un método flexible, que puede adaptarse a las decisiones que quiera adoptar una empresa	Es limitado, para situaciones específicas.	Es un método flexible, ya que utiliza algunas variables para posicionarse en distintas situaciones.
Se usa normalmente para valuaciones complejas	Se usa normalmente para valuaciones simples.	Se usa normalmente para valuaciones complejas.
Es un método discreto; solo varía en una serie de momentos del tiempo	Es un método continuo, ya que el valor de la variable puede cambiar en cualquier momento.	Utiliza una distribución normal para situarse en varios supuestos y poder determinar los rangos de probabilidades.

Tabla 6. Tipo de modelos para solución de VOR [94].

3 Estado del arte

En el acto de analizar y proponer modelos de evaluación para la venta y compra de minerales empleando métodos de valoración, es relevante entender la relación de la operación con los implicados y entender que, toda actividad económica se ve exigida por su entorno y la naturaleza inherente de su concepción y propósito, es así como mediante los análisis, investigación y desarrollo, se logra a través de la innovación la aplicabilidad de metodologías que permiten medir las capacidades financieras y los rendimientos esperados de acuerdo con estas condiciones, y así que tal actividad económica alcance la administración y distribución de los recursos a partir de los cuales se fundamenta. Todo margen de rentabilidad esperado de una actividad dependerá de estos análisis previos, la naturaleza de la actividad, de su envergadura (cantidad y calidad) y el músculo financiero a partir del cual se realizará la misma. La minería, especialmente la metálica, se enfrenta a riesgos técnicos y estratégicos que dependen de factores internos y externos, como se mencionó, esta actividad es llevada a cabo en diferentes escalas, por variedad actores y por diferentes condiciones de negociación entre estos, por eso a la hora de ahondar en la minería metálica, en particular la de oro, es precedente revisar algunas las investigaciones que se han realizado sobre la misma desde la pequeña minería y su relación con la gran industria, el Estado, las sociedades y los entes internacionales, además, su participación en la cadena de valor y la relación con el entorno, además, de la aplicación de metodologías para la valoración de las incertidumbres y la mitigación del riesgo.

El sector de la pequeña minería se encuentra estigmatizado y rodeado de incertidumbres, esta porción se dedica en muchas ocasiones a operaciones de subsistencia a través de explotaciones poco técnicas que deterioran el ambiente y agotan la disponibilidad de ciertos recursos naturales, además de las consecuencias sociales, además, de las consecuencias por la participación de la proporción que pertenece al sector informal. En Colombia, la minería metálica de oro presenta la situación descrita, no obstante, la aparición de este tipo de actividad demuestra que el desempleo en las localidades se reduce rápidamente en un 3,5%, pero a su vez aumenta las probabilidades de que, por falta de regulaciones laborales, las probabilidades de que menores de 18 años sean empleados aumente en un 9,3% y la asistencia a la escuela disminuya un 23,9 de acuerdo con el estudio Santos [95], lo que demuestra que las regulaciones alrededor de esta actividad deben ser mayores en aras del desarrollo de la sociedad. Tal regulación se ve

enfrentada este tipo de problemas sociales, además, de las condiciones tradicionalistas y de concepto que tienen la mayoría de los mineros pequeños y artesanales pero, las políticas de formalización ayudan a combatir este tipo de adversidades y que la actividad esté regida bajo los parámetros legales para disminuir la contaminación y que los entes gubernamentales puedan percibir impuestos y las sociedades mayor desarrollo a partir de la inversión de las regalías, pero, esta política debe estar acompañada por el Estado a partir de personal calificado y no como se realiza actualmente como resalta Hilson et. al [96] en su estudio. El acompañamiento debe estar basado en la capacitación, en el entrenamiento, la accesibilidad a la educación y programas técnicos sin amplio trámite burocrático, de otra manera, estas iniciativas son poco efectivas y promueven el continuo uso de prácticas inadecuadas como argumentan Veiga y Marshall en su estudio acerca de la formalización minera en Colombia [97].

La ausencia de formalización en el sector también trae consigo baja productividad, creación de pasivos ambientales, la evasión de impuestos ante el gobierno, la existencia de empleos poco remunerados y la no afiliación de los empleados al sistema de seguridad social. La declaración de regalías producto de la explotación de minerales es una obligación por parte de los titulares mineros, subcontratistas de formalización, beneficiarios de áreas de reserva especial y comercializadores, Múnera y Virgen Serna en 2019 [98], evidencian que el recaudo de impuestos y regalías no es concordante con la producción de oro reportada por Colombia dado el alto nivel de informalidad de la actividad y evalúan la efectividad de los programas de formalización implementados y su correlación con la recaudación de regalías teniendo como base el Programa Oro Legal (POL) de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID, por sus siglas en inglés). Es así como mediante análisis econométricos, empleando datos de minas pequeñas y medianas desde el cuarto trimestre de 2016 hasta el primer trimestre de 2019, y usando regresiones lineales para medir la correlación entre el nivel de formalización y el pago de regalías, hallan que al aumentar un 1% en el nivel de formalización, este representa un incremento de 41.800 pesos en el pago trimestral de regalías por cada Unidad de Producción Minera (UPM) en proceso de formalización y en lo que concierne al POL que, para tal momento contaba con 211 y cuya meta es formalizar mínimo el 75% de estas, se evidenció que estas UPM representarán 2.646 millones de pesos anuales, equivalente

al 2% del recaudo nacional, si se toma como referencia el recaudo en regalías del 2017 según datos de la UPME [99].

Es evidente entonces que, la pequeña y mediana minería formalizada de oro juega un papel importante en la economía del país, además, de su impulso en el encadenamiento hacia adelante y hacia atrás. El primero de ellos refleja relaciones para proveer insumos para la producción de otros bienes y servicios a nivel local e internacional, además, de promover la creación de actividades productivas que demanden del mineral. Por otra parte, los encadenamientos hacia atrás se refieren a la creación de empleos directos e indirectos, además, de generarlo en zonas remotas como fue analizado por Fedesarrollo [100]. No obstante, como se mencionó, en su mayoría, este tipo de minería carece de un músculo financiero abundante y de asistencia técnica de tiempo completo, por ello, las mejoras en el sector se verán reflejadas a partir de la implementación de los estándares y buenas prácticas minero-ambientales proporcionadas por los entes gubernamentales y el sector privado.

La participación de las empresas como se enunció es fundamental para crear una coexistencia y encaminar al sector de la pequeña y mediana minería a adecuar e incorporar las medidas legales y técnicas para llevar a cabo sus operaciones. Dentro de los procesos de formalización en el país, se destacan las iniciativas llevadas a cabo por empresas como Mineros S.A., Aris Mining Corporation, Gramalote Colombia Limited y Zijin Continental Gold [101].

Mineros S.A. resalta por su proyecto aluvial Nechí, el cual se lleva a cabo en los municipios de El Bagre, Zaragoza, Cauca y Nechí. La empresa consciente de que en sus concesiones la MAPE realiza procesos fuera del margen legal y técnico, encaminó sus procesos de formalización mediante la devolución de áreas para formalización y contratos de operación agregando apoyo técnico, ambiental, social y empresarial a estos grupos [102]. Para finales del año 2022, la empresa contaba con once unidades operativas que generan más de 200 empleos directos y cuyo mineral es comprado por Mineros S.A, además, de que las unidades utilizan maquinaria menos robusta que la de la misma empresa y que permite el acceso a zonas que no eran rentables para la compañía [103].

Por otra parte, Aris Mining cuenta con dos operaciones en dos locaciones diferentes como se mencionó en el apartado 2.2.1 del presente trabajo. En sus operaciones en los municipios de Segovia y Remedios ha realizado encadenamientos mediante contratos de

operación con mineros que han realizado trabajos en esta zona a través de los años mediante la creación de unidades de producción minera y contratos outsourcing (contratos realizados con empresas locales para realizar trabajos de explotación en zonas ya abandonadas). Aris Mining implementa un modelo operativo con la MAPE para eliminar el uso de mercurio, contribuir a legalizar sus empleos, mejorar la seguridad y el desarrollo económico y social de este conglomerado, además, realiza monitoreo a estas operaciones y realiza el pago a los mineros formalizados a partir del oro recuperado por el material a granel que luego se procesa en su planta María Dama y se vende por la compañía [104]. De esta forma, para 2022 contaba con 63 contratos operacionales, más de 12.000 personas afiliadas a los sistemas de seguridad social y una producción acumulada desde el año 2012 entre las unidades de producción y los contratos outsourcing de 952.287 onzas de oro [105]. Adicionalmente, teniendo en cuenta la experiencia y los resultados obtenidos en sus operaciones en Segovia, Aris Mining firmó un contrato de operación con la empresa Porvenir S.A.S el 20 de abril de 2023 para la formalización de 256 mineros en el municipio de Marmato y realizar la explotación del nivel 16 de la Mina La Maruja [106], [107].

Gramalote Colombia Limited es una empresa que se dedica a la exploración y extracción de metales preciosos y actualmente cuenta con licencia ambiental aprobada para llevar a cabo sus operaciones a cielo abierto para la extracción de oro y sus minerales concentrados en el municipio de San Roque, Antioquia. En aras de apoyar la formalización minera, Gramalote entre los años 2018 y 2021 ha logrado la formalización de 28 unidades de producción minera, otorgando 100 hectáreas de sus títulos y beneficiando 200 mineros [108], [109]. La compañía realiza acompañamiento técnico a todas las formalizaciones realizadas, aunque, para el caso de Mineros La María S.A.S, la cual fue la primera empresa formalizada, contó con la inversión de Gramalote para la consolidación y realiza el proceso de venta de su mineral a la empresa Antioquia Gold LTD [101].

En el municipio de Buriticá se lleva a cabo la operación llevada a cabo por Zijin Continental Gold. Los procesos de formalización realizados por esta empresa se han llevado a cabo desde 2014, liberando áreas para que los subcontratos de formalización y contratos de operación realicen los procesos de explotación [101]. El proceso ha sido cambiante, donde

la empresa ha realizado tanto acompañamiento técnico como inversiones y entrenamiento al personal de las empresas formalizadas. Al igual que al proceso llevado a cabo por Aris Mining, Zijin Continental Gold procesa el mineral extraído y el minero formalizado recibe contraprestación económica por el mineral explotado [101]. La formalización en el proyecto Buriticá ha permitido un encadenamiento para el desarrollo social y económico generando una coexistencia y cooperación para el desarrollo y crecimiento de la pequeña minería [21]. A corte del año 2022, la empresa contaba con 12 formalizaciones con una plantilla total de 254 empleados, de los cuales 132 son mujeres y las cuales generaron una producción de 140,95 kilos de oro que, produjo 1.224.824.058 millones en impuestos correspondientes de IVA, de renta y de ICA [21].

Con referencia a las cuatro iniciativas de formalización descritas, Tarra Almarío ha analizado la coexistencia entre la MAPE y estas 4 empresas. En su estudio identificó que la coexistencia colaborativa puede garantizar el ingreso a la cadena de valor al pequeño minero partiendo desde la obtención de insumos hasta la explotación y comercialización del oro [101], no obstante, el éxito de este ingreso dependerá de la supervisión constante de la empresa, además, dentro de las buenas prácticas de las 4 empresas destaca el acompañamiento técnico, la capacitación, asistencia en temas administrativos y financieros, la promoción de normativas para la seguridad y salud en el trabajo, entre otros.

También otros autores han descrito, analizado y desarrollado iniciativas para estandarizar y apoyar las operaciones de la MAPE al igual que proponer herramientas para mejorar la coexistencia entre las grandes empresas y este sector. Rada Bermúdez en 2018 [110], caracteriza e identifica los factores más influyentes en el proceso de formalización minera, obteniendo aspectos preponderantes en políticas de salud y seguridad en el trabajo, afiliación de empleados al sistema de salud, acceso a los sistemas bancarios, reglamentación, entre otros. Asimismo, en 2019, Velilla propone un modelo de negocio sostenible para unidades de producción minera de oro informal, a partir del planteamiento, se denota que uno de los principales retos de la propuesta es el entorno social donde se ejecutan las actividades mineras y el modelo de lienzo se presenta como una importante herramienta para el entendimiento de estas dinámicas y el desarrollo de arreglos organizativos de las fuerzas de trabajo, adicionalmente, se propone el marco de asociatividad entre unidades de producción de acuerdo con sus características para solventar y absorber los gastos y costos de permanecer en la legalidad [111]. De la misma manera, Villegas García [112], propone un modelo de gestión de operaciones para el

fortalecimiento del área de formalización minera, bajo el formato propuesto por la empresa Zijin Continental Gold en su proyecto Buriticá, el modelo propuesto se basó en 4 dimensiones estratégicas: Planeamiento, producción, seguridad y finanzas, a partir de este se busca fortalecer la productividad y la competitividad de las UPMs respecto a los metros de avance, toneladas planeadas para entrega (Cantidad y ley programada), rendimiento de las operaciones, disminución de los riesgos de seguridad y salud en el trabajo y control financiero de las operaciones a partir del seguimiento y formulación de índices para el manejo de los costos y los ingresos.

A la implementación de este tipo de modelos, también es válido analizar que las inversiones en los proyectos mineros son secuenciales y dependen de diferentes circunstancias, además, las explotaciones son finitas y por ende exige una planeación estratégica que contemple todos los periodos, incluyendo el cierre de estos. De acuerdo con la legislación colombiana, esto es obligatorio para todos los explotadores. Barros Miranda [113], analizando el flujo y la secuencia de los proyectos mineros de pequeña escala, identifica que la exigencia de un instrumento financiero que cubra el 100% de los costos de implementación del plan de recuperación se realiza al final de la vida útil de la explotación minera, etapa en la cual, si no se ha realizado una buena planeación del proyecto, tanto técnica como financieramente, existe la posibilidad de que el titular presente mayor dificultad de llevar a cabo el plan de cierre, dada la reducción del flujo de caja en las fases finales de la operación [113] y en este tipo de proyectos no se contempla este escenario de los costos asociados al tema. A partir de su planteamiento se construye un instrumento financiero que le permita al Estado y a la pequeña minería en Colombia los recursos económicos para un adecuado cierre y abandono de las minas.

No solo es importante fijarse en la situación de Colombia, el aporte de la minería de oro en sus encadenamientos muestra que hay una relación con el medio local e internacional. Desde el trabajo interno (medio local), a partir de la revisión e investigación, es posible observar que la extracción de este metal es importante en el desarrollo de las empresas locales, la innovación y la competitividad de estas, como se expone en los casos exitosos de Australia, Chile y Canadá. Estos países mediante el trabajo conjunto entre el sector privado y el público han logrado impulsar el aporte de bienes y servicios por parte de

proveedores locales para la minería de sus territorios, por ejemplo, en Australia el 36% de la demanda de bienes y servicios provienen de la minería de oro, los proveedores locales forman agrupaciones respecto a las necesidades de las empresas, el tipo de minería y la región, esto según los datos presentados por Fedesarrollo [100]. Por otra parte, gracias al crecimiento de la demanda de oro certificado, especialmente por la industria suiza, la comercialización internacional de este metal se ha convertido en una transacción importante, por ende, el origen del metal debe garantizar todo un proceso claro y legal de acuerdo con el marco legislativo para la minería y el comercio de minerales del país de donde se emita. Mamani en 2020 [4], basada en la legislación actual de Perú para la producción y comercialización de minerales propone un sistema de trazabilidad y asesoría para los pequeños productores mineros de la Región de Puno. Lo anterior debido a que la comercialización de minerales en tal país no requiere de un contrato de concesión minera, sin embargo, en apoyo a la formalización del pequeño productor, el comprador de los productos de estos mineros debe estar obligado a verificar el origen del metal. A través de este sistema también se contribuye al ordenamiento interno de los procesos de explotación y beneficio, se promueve y se fomenta la formalización de la pequeña minería, se impulsa la gestión ambiental responsable permitiendo el acceso a mercados justos que consienten mayores beneficios económicos entre la venta de exportación a la del mercado local. Además, dado el alza del precio de este metal, es que este metal es sumamente valioso para exportación puesto que los países acaparadores lo emplean como reserva de valor para regular la economía, además, de que es una cobertura ante la volatilidad del dólar y los peligrosos niveles de inflación.

Otro estudio importante, observando el caso de la pequeña minería de Perú y su importancia en la producción de minerales para la región sudamericana, es realizado por Aliaga Zapana en 2017 [114]. En este se describe el instrumento de control para garantizar el origen y la trazabilidad del oro usado por la legislación minera peruana para la comercialización de minerales de oro y sus concentrados. Tal herramienta se conoce como Registro Especial de Comercializadores y Procesadores de Oro (RECPO) y a partir de los datos del registro concluye que en la zona de Juliaca (Perú) existen muy pocos comercializadores inscritos en el registro que cumplen con las normas establecidas de la formalización, por lo que se deduce que, en tal zona, predomina la informalidad y por ende existe una fuerte evasión tributaria y esto causa una alta situación de desigualdad y

competencia desleal entre las operaciones formales e informales y, lo anterior debido a que el costo de la formalidad no es asumido por quienes realizan actividades informales.

Continuando con la revisión de la pequeña y mediana minería de oro en la región, Zubieta Garay en 2013 [115], realiza un análisis de la venta de concentrados de oro desde Bolivia hacia Estados Unidos. En su análisis se evidencia que el mercado de la venta de concentrados es un negocio en crecimiento producto de la alta demanda de los compradores para utilizar este metal como activo refugio y su capacidad para ser transable en otros instantes dependiendo de la conveniencia y condiciones del mercado. Además, a través del empleo de los datos de los productores de concentrados en ese país, las cantidades exportadas, el volumen de producción y variables de entradas a partir de supuestos, genera un modelo econométrico para medir la relación de los índices de producción y su relación con los datos históricos del país y así determinar los factores que influyen en la producción de mineral de oro y su participación en el mercado. Partiendo de los resultados del modelo, se obtuvo que a razón del poco incentivo en la producción durante el periodo de 2000 a 2005 y a la falta de medidas para la comercialización y el contrabando, la producción de oro fino se vio afectada y durante el periodo que hubo un aumento significativo en la producción (2006-2012) se debió a la participación del gobierno mediante la creación de una empresa acumuladora.

Es evidente que, existe una fuerte injerencia de los entes gubernamentales como los participantes capaces de regular la actividad minera mediante mecanismos efectivos de control y por lo tanto su presencia y habilidades para trabajar de la mano con la pequeña y mediana minería, además, de otras empresas del sector privado es importante, por ello es crucial promover el incentivo a la formalización y el crecimiento de la producción certificada de la mano de los compradores como se ha evidenciado en la literatura revisada. La ausencia de estas medidas pone en jaque el sector activando los riesgos y generando inestabilidad para los participantes directos e indirectos quienes estarán involucrados en disconformidades. Así, poner en marcha un proyecto minero o una inversión en el sector requiere de un análisis de los riesgos y realizar una evaluación de ellos.

Los modelos de evaluación desempeñan un papel crucial tanto para la pequeña como para la gran minería al proporcionar una evaluación objetiva y rigurosa de la rentabilidad y el valor de los proyectos mineros. En el caso de la pequeña minería, donde los recursos y el acceso a capital son limitados, los modelos de valoración financiera permiten a los empresarios y a los inversores tomar decisiones informadas sobre la viabilidad de los proyectos. Por otro lado, en la gran minería permite justificar las inversiones a largo plazo, los rendimientos esperados y los argumentos necesarios para justificar la envergadura de la inversión. Así, tales modelos ayudan a evaluar los flujos de efectivo esperados, los costos de producción y los riesgos asociados, brindando una visión clara de la rentabilidad y permitiendo una asignación eficiente de los recursos disponibles. Es válido añadir que, estos modelos admiten evaluar el rendimiento financiero a largo plazo, considerando múltiples variables como los precios de los metales, los costos operativos, los impuestos y las regulaciones gubernamentales. Al mismo tiempo, permiten considerar y determinar los momentos oportunos para realizar inversiones adicionales o desinvertir.

La minería se enfrenta a factores modificadores que requieren de una gestión técnica y financiera. Las incertidumbres económica, social y ambiental son una de las fuentes externas más importantes de poca certeza, de modo que, si no se realiza un adecuado control, estas pueden tener un fuerte impacto sobre las inversiones. Existe un alto riesgo financiero para el sector minero como muestra McClain en 1996 [116], la severidad del riesgo fue obtenida a partir del empleo de la metodología ARCH (Autoregressive conditional heteroscedasticity por sus siglas en inglés) para una muestra seleccionada y se apreció que el riesgo y su volatilidad no son constantes, pero tienen un comportamiento notable a través del tiempo. También, Nieto en 2020 [42], con el fin de medir la inestabilidad que provocan los conflictos sociales, propuso un índice que permite analizar el riesgo socioeconómico con el propósito de evitar los problemas de factibilidad y financieros en futuras inversiones mineras. En él concluye que, los proyectos se ven mayormente afectados durante las etapas de prefactibilidad/factibilidad porque son las etapas donde se debe tener una adecuada relación con las comunidades y las consultas sociales. Además, destaca la importancia de la planeación para la obtención y uso de los recursos estratégicos, este índice podría utilizarse como instrumento para el análisis de riesgos y proporcionar información relacionada con los recursos estratégicos.

Ahora bien, la volatilidad es una característica principal de las variables que tienen una relación con las series del tiempo en el ámbito financiero, la minería metálica guarda relación inherente con riesgos cuyas variaciones dependen de variables que presentan fluctuaciones en el tiempo y que tienen un impacto fuerte sobre el valor financiero, la volatilidad del precio representa una de estas variables. El valor financiero en minería es comúnmente estimado a través de los métodos FCD, los cuales son metodologías estáticas ante la volatilidad de las variables que afectan esta cuantía. Ya que es este tipo de modelos no proporcionan la flexibilidad necesaria para una evaluación económica viable, es notable que las investigaciones en el sector minero para la valoración financiera de proyectos han apuntado a encontrar resultados que contemplen las variaciones existentes y encontrar resultados acordes que contrasten tal incertidumbre. Una comparación entre los métodos de FCD y la VOR, Savolainen en 2016 [59], realiza una revisión de la literatura y realiza un estado del arte acerca de la aplicación de la VOR en la valoración de proyectos mineros metálicos y menciona sus ventajas respecto a los métodos de valoración tradicionales. Por otra parte, teniendo en cuenta el precio de las materias primas fue llevada a cabo por Samis et al. [117] en 2005. En esta labor se tomaron los contratos a plazo de cobre estimados para incluir el riesgo asociado al precio del cobre y así tomar la mejor elección entre dos posibles proyectos de inversión. A partir de su estudio se concluye que se requiere de un método de valoración que considere la volatilidad asociada al precio de las materias primas y a los márgenes operativos y que mediante cálculos econométricos es posible encontrar un comportamiento del precio dada la existencia de los datos. No obstante, esta propuesta no tiene en cuenta otra incertidumbre diferente que la asociada al precio del cobre. Asimismo, un estudio similar fue encausado por Sabour y Wood en 2009 [118]. En él se analizó el riesgo financiero inherente al precio de los metales y la tasa de cambio y se compararon ambos métodos de valoración a través de un análisis de sensibilidad para determinar la vida óptima de una mina de cobre y oro. A partir del análisis se evidenció que el análisis estático y determinista de los precios y la tasa de cambio no aportan información significativa al planeamiento minero, mientras que mediante la VOR mostró un mejor tratamiento al modelo financiero y una óptima captura del valor estratégico.

Por otra parte, Haque, Topal y Lilford en 2014 y 2017 [119], [120], realizaron una evaluación a través de VOR para una mina hipotética de oro, introduciendo parámetros para la solución de ecuaciones diferenciales parciales. En su primer estudio emplean el método de las diferencias finitas (MDF) y el software MatLab para obtener valores asociados a las opciones reales disponibles. Para este análisis se introduce la volatilidad del precio del oro y se determina su relevante impacto sobre los valores del proyecto minero. Luego, en una segunda entrega, para evaluar la viabilidad de un proyecto minero de oro de una forma más precisa a través del método de VOR, incorporan al modelo la volatilidad inherente al precio de la materia prima y la tasa de cambio, y los parámetros de correlación entre ellos. Allí encuentran que, cuando se contempla solo la volatilidad del precio de la materia prima, el proyecto es sobreestimado y que los precios del metal y las tasas de cambio son, en forma conjunta, las incertidumbres externas más complejas a las que se ven enfrentadas las empresas ya que a partir del comportamiento de estas, las directivas de las empresas pueden tomar las opciones de aumentar la producción, esperar condiciones óptimas de mercado o detener por completo las operaciones. La importancia de la influencia del precio de la materia prima y la tasa de cambio también fueron analizadas por Aminrostamkolae et. al [121], en su modelo propuesto incluyen ambas variables y emplean una función de base radial (FBR) para aproximar los valores numéricos de un proyecto de extracción de oro. De esta investigación, se obtiene que la FBR cuenta con características atractivas en contraste con el método implícito de diferencias finitas y el MDF explícito, además que, una volatilidad creciente tanto del precio del oro como de la tasa de cambio causan un decrecimiento en el valor de los proyectos y por lo contrario si el coeficiente entre ambas variables aumenta, la volatilidad disminuye y por consiguiente el valor del proyecto aumenta y por lo tanto la correlación entre ambas variables juega un papel importante a la hora de definir el valor de los proyectos mineros.

En el contexto colombiano, Clavijo en 2016 [122], realizó un estudio de los principales problemas que poseen las minas para realizar valoraciones bajo incertidumbre y analiza los modelos matemáticos para la resolución de problemas empleando la VOR. En añadidura, análisis del impacto del precio del oro mediante la VOR, también ha sido tratado, en una investigación realizada en 2017 por Arango, Montes y Arboleda [123], se estudió la opción real de abandono para un proyecto de inversión minera de oro, en este se empleó la metodología Box Jenkins estimando un modelo econométrico de volatilidad tipo GARCH (Generalized AutoRegressive Conditional Heteroskedasticity, por sus siglas

en inglés) para examinar la volatilidad del precio del oro como insumo principal para el análisis. A partir de la formulación, se obtuvieron resultados que fueron contrastados con simulaciones Montecarlo y se concluyó que el modelo GARCH es una buena estimación para el rendimiento y estimación de la volatilidad del precio del oro, además, se pudo observar que la inversión del proyecto cuenta con viabilidad para iniciar operaciones y no emplear la opción real de abandonar.

La viabilidad de un proyecto y su valor financiero, no solo dependen de las variables que tienen fluctuaciones en el mercado, sino que también involucra factores modificadores internos. Los riesgos geológicos (cantidad y calidad de los minerales explotables) y la variabilidad de los costos operativos (extracción y beneficio) son otras problemáticas que se relacionan con las inversiones. Los recursos geológicos deben ser bien delineados y delimitados para obtener el mayor beneficio económico a través de una operación sustentable en el tiempo y esto se logra mediante el análisis del ciclo de vida del proyecto y sus gestiones técnicas y del negocio. El VPN permite evaluar el valor actual de los flujos de efectivo esperados durante la vida útil de los proyectos y mediante la incorporación de metodologías de valoración es capaz de evaluar incertidumbres. Dimitrakopoulos y Sabour en 2007, estudian las flexibilidades operativas que contemplan las incertidumbres geológicas y el precio de las materias primas, su aplicación se realizó para una mina que ya ha sido explotada y comparan la VOR con el cálculo estático del VPN y establecen que el diseño basado en VOR tiene un valor entre un 11 % y un 18 % más que el diseño basado en un VPN fijo, ya que tiene en cuenta la incertidumbre de las variables que impactan el VPN, y lo trata como una variable estocástica, en lugar de estática, además, la técnica VOR representa una herramienta para saber a medida que avanza el proyecto, cuál es la probabilidad de éxito de tomar decisiones como expandir capacidad de producción, reducirla o incluso abandonar el mismo [124]. También, Sabour, Dimitrakopoulos y Kumral [125], a través del empleo de la simulación Monte Carlo usaron las incertidumbres asociadas a las tasas de cambio, el precio de las materias primas y el riesgo geológico para clasificar los diseños de las minas simuladas y optimizar los mismos a través del software Whittle.

Asimismo, Franco Sepúlveda, Campuzano y Pineda [61], realizan una valoración para un proyecto minero a cielo abierto de oro a gran escala. En este estudio se simularon dos escenarios para la obtención del VPN, uno de alta y otro de baja certeza. Además, emplearon el modelo de costos de O'Hara y el retorno neto de fundición (RNF), con el fin de determinar a qué variables del proyecto es más sensible el VPN. Así, se logra identificar que el principal influyente dentro del VPN es el precio del oro por su volatilidad, en segundo lugar, la ley del mineral, por lo que continuar la exploración y tener controles de calidad para tener datos confiables es necesario y por último la recuperación metalúrgica, lo que implica optimizar y diseñar una planta de beneficio eficiente. También, proponen para estudios futuros este mismo tipo de valoraciones para la minería a pequeña escala, donde el capital de inversión es más limitado y las decisiones se toman bajo escenarios de baja certeza.

La incertidumbre asociada al precio de los metales es un proceso económico que está regido por muchos factores y es incontrolable tanto para inversionistas como para los operadores de las minas, así, una mina se verá más expuesta cuando la explotación es llevada a cabo para varios metales. Empleando el método Monte Carlo, Sabour y Poulin [126], estudiaron la flexibilidad operativa para una mina polimetálica (7 metales) analizando el precio de estos, a partir del análisis, se encontró que los valores de las flexibilidades operativas para un cierre temporal y abandono de la mina durante periodos de precios bajos son 11 y 49% respectivamente de la estimación del VPN clásico. Teniendo en cuenta las experiencias reales de la industria, se descubrió que el valor de aumenta directamente con el nivel de incertidumbre e inversamente con el nivel de los precios iniciales de los metales [126].

Observada la revisión bibliográfica realizada hasta el momento, las investigaciones elaboradas han apuntado a considerar la importancia de la minería formalizada, su participación en la cadena de valor y los programas y sistemas de gestión tanto para este tipo de minería como la de gran escala. Desde un punto de vista legislativo y tributario es una meta para alcanzar y esto proporcionaría un nuevo trasfondo social, ambiental y financiero para las partes involucradas, en añadidura. La forma de estimar la viabilidad de este tipo de proyectos en minería es aplicar metodologías de valoración que ayuden a atenuar los riesgos y considerar la flexibilidad ante los escenarios que suceden y los que pueden ocurrir. Como se mencionó en el marco teórico del presente trabajo, existen diferentes tipos de metodologías para utilizar dependiendo del alcance y el número de

variables presentes. Las simulaciones son metodologías que permiten un tratamiento de mayor cantidad de variables y obtener soluciones a través de medios computacionales, no obstante, dados los avances en las metodologías de inteligencia artificial, los procedimientos metaheurísticos han surgido como metodologías que usan procesos iterativos que combinan conceptos y decisiones de forma inteligente para explorar y explotar de forma adecuada el espacio de búsqueda [127]. Los algoritmos generados normalmente son aprovechados para optimización o encontrar un objetivo específico y puede que hallen soluciones exactas como soluciones aproximadas como menciona González [127]. En publicaciones realizadas por Vélez y Montoya en 2007 [128], y Maldonado en 2016 [129], se describen los principales algoritmos, entre los cuales se encuentran: algoritmo de búsqueda Tabú, algoritmo genético, algoritmos GRASP, secuenciamiento de operaciones, entre otros. Asimismo, Ramírez en 2016 [130], realiza una comparación entre las metaheurísticas y los algoritmos de estimación de distribución en procesos estocásticos, a partir de su investigación describe el origen de las metodologías y muestra que el procedimiento a escogerse depende del tipo del problema, del conocimiento de este y que no hay una estrategia mejor que otra, puesto que como mencionó, depende de la naturaleza del problema.

La aplicación de algoritmos metaheurísticos no ha sido ajena al campo minero, Franco Sepúlveda et. al en 2019 [131], realiza una revisión al estado del arte acerca de la aplicación de algoritmos neuronales y metaheurísticos aplicada a la minería a cielo abierto para la maximización del VPN. También, Noriega y Pourrahimian en 2022, investigaron acerca de las aplicaciones de las técnicas de Inteligencia artificial aprovechadas a la planificación minera estratégica. La investigación se dividió en tres campos: la planificación y programación de la producción, gestión de equipos y control de las leyes y se encontró que los métodos más empleados los algoritmos y la simulación discreta. Ambas investigaciones reúnen amplios datos acerca del empleo de este tipo de metodologías para la valoración en el campo minero, por lo que es recomendable chequear el estado del arte respecto a esta temática para generar un espectro más amplio y proponer futuras aplicaciones de esta creciente innovación de las herramientas de manejo de datos.

Descrita la revisión bibliográfica anterior, se finaliza este capítulo del estado del arte en lo que respecta un modelo de evaluación económica y financiera de compra de mineral a terceros de una empresa minera a través de la valoración de proyectos bajo. Se evidenció la importancia de la minería formal, la implementación de sistemas de gestión y su importancia en la cadena de suministro de mineral y su relación con los entes legales, compradores nacionales e internacionales y la creación de redes de bienes y servicios entre proveedores locales y de la región. Además, se hizo una revisión a los enfoques de valoración determinista, probabilística y métodos de inteligencia artificial y algoritmos para que las empresas mineras evalúen de manera más precisa y completa la viabilidad económica de sus inversiones y operaciones, y se considere para el presente trabajo la factibilidad de adquirir mineral de terceros. Los modelos estudiados consideraron los flujos de efectivo esperados, los riesgos asociados y los escenarios inciertos que pueden afectar la rentabilidad del negocio. Al incorporar técnicas avanzadas, se obtienen resultados más realistas y se facilita la toma de decisiones estratégicas. En última instancia, este enfoque permitirá a las empresas mineras maximizar el valor y mitigar los riesgos, contribuyendo así a una gestión financiera más sólida y sostenible. En el siguiente capítulo, se describirán las características del modelo de evaluación propuesto y el cual será utilizado para evaluar la viabilidad de la adquisición de mineral de terceros de una empresa minera.

4 Modelo de evaluación económica y financiera propuesto

Después de haber realizado un análisis detallado del estado del arte respecto a los modelos de compra y venta de minerales para la pequeña minería y los métodos de valoración bajo incertidumbre, se identifican las metodologías utilizadas para realizar la propuesta del modelo del presente trabajo. Se presenta el modelo de evaluación económica y financiera propuesto para la compra de mineral a terceros por parte de una empresa minera. En primer lugar, se describe en general el modelo propuesto y sus características junto con la nomenclatura a emplear. Luego, se definen las ecuaciones que se utilizarán y por último las funciones objetivo del ejercicio. La proposición se ha desarrollado con el objetivo de proporcionar un marco integral y riguroso para evaluar la viabilidad y rentabilidad de adquirir mineral de proveedores externos. Se basa en la valoración de proyectos bajo incertidumbre y la utilización de técnicas como la valoración probabilística y el análisis de sensibilidad, para tener en cuenta los flujos de efectivo esperados, los riesgos y los escenarios inciertos que pueden afectar la decisión. Es de añadir, que el modelo propuesto tiene sus cimientos sobre las incertidumbres de mercado e incertidumbres operativas. Además, en este caso, el modelo se formuló para la venta y compra de oro, por lo que es necesario analizar la captación y comercialización de otros minerales y, el diseño y las capacidades de planta de procesamiento para transformar y beneficiar manteniendo índices metalúrgicos aceptables que provean una herramienta precisa y confiable para tomar decisiones informadas, maximizar el valor y optimizar los recursos en el contexto de la compra de mineral a terceros.

4.1 Descripción general del modelo

El modelo basa su propuesta en la optimización del VPN de la empresa considerando las variables que afectan los costos de aprehensión, tratamiento y comercialización del mineral comprado a terceros, además, de los costos operativos incurridos al extraer el mineral proveniente de las operaciones propias (mineral propio de ahora en adelante) ya que ambas situaciones se llevan a cabo en forma simultánea. Además, se tuvieron las

siguientes consideraciones para obtener mayor claridad respecto a las operaciones unitarias:

1. El material explotado de las operaciones se clasifica en función del tenor de corte, valor que es aportado por los análisis llevados a cabo en laboratorio químico. En esta consideración, solo se tendrá en cuenta el material mineralizado extraído de las operaciones de mina, por lo que no se contempla el material que va a botaderos o relleno.
2. El mineral comprado proviene de explotadores mineros autorizados como los mencionados en el capítulo 2 apartado 2.3 en cantidades y calidades establecidas por ambas partes.
3. La planta de beneficio realiza el procesamiento en conjunto del mineral propio y del mineral de compra, lo que se conoce como mezcla o blending.
4. La planta de beneficio no realiza procesos de fundición y refinación.

En la figura 8 esquema se describe el proceso llevado a cabo por la empresa minera aurífera.

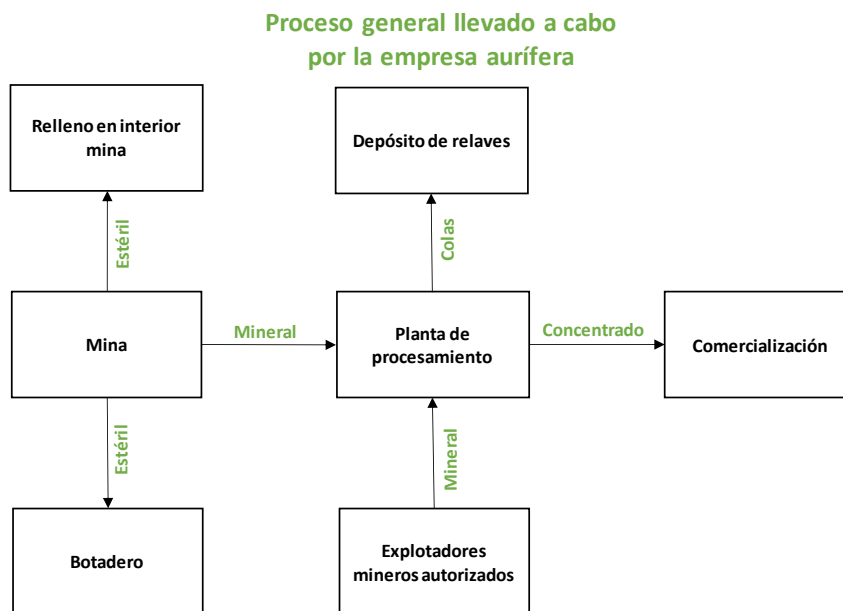


Figura 8. Flujograma de los procesos de extracción, compra y beneficio de la empresa minera. Elaboración propia.

4.2 Característica, consideraciones y restricciones

A continuación, se enumeran las características transcendentales del modelo propuesto junto con sus consideraciones y restricciones para el modelo de evaluación propuesto:

1. Dentro del proceso llevado a cabo por la empresa minera aurífera solo se considera el oro como el único metal para el modelo.
2. Se considera la incertidumbre de mercado. El comportamiento respecto a los precios del oro y la tasa de cambio son estimados mediante simulaciones a partir de los datos proporcionados por la empresa minera.
3. Se considera la incertidumbre operativa. La capacidad de procesamiento es la máxima, se tienen en cuenta los índices metalúrgicos y la proporción de suministro entre mineral propio y mineral de compra se iguala a esta capacidad máxima nominal (1.600 t/día), no obstante, el porcentaje de aporte varía de acuerdo con los escenarios propuesto.
4. Si bien la naturaleza del negocio de la empresa minera (extracción, compra, beneficio y comercialización) generan ingresos y egresos, se considera como inversión inicial el capital de trabajo destinado para compra de mineral. Además, de que no se discurren inversiones por construcción y montaje de la planta de procesamiento, puesto que ya se encuentra en etapa de producción.
5. La metodología para realizar en análisis es la simulación Montecarlo. A través de esta, se asignan funciones de distribución a las variables de entrada (inputs) y se ejecuta la simulación.
6. Se consideran como variables del modelo la ley del mineral propio y de compra, la recuperación metalúrgica, la TRM y el precio del oro. Se consideran 10 años de operación, que puede variar según el analista determine y el modelo se autoajustará.
7. La ley del mineral propio será variable y estará determinada por el histórico de producción proporcionado por la empresa minera.

8. La ley del mineral de compra será variable y estará determinada por el histórico de datos de producción proporcionado por la empresa minera.
9. Los costos por comprar mineral a terceros se consideran variables, su valor depende de la cantidad y la ley. Además, los costos de comercialización, gastos generales y administrativos dentro y fuera de la operación (G&A-On site and G&A Off site por sus siglas en inglés) y costos de las áreas soporte se consideran fijos. Por otro lado, los costos del mineral propio quedarán determinados por los datos históricos proporcionados por la empresa minera.
10. El margen de rentabilidad asociado a la compra debe ser superior al 15%. Además, el porcentaje a reconocer por regalías es del 4% de acuerdo con la legislación colombiana.
11. Se considera una tasa de descuento fija del 15%.
12. Además, es de tener en cuenta que esta empresa no realiza labores de refinación en sitio, por lo que su producto final son concentrados gravimétricos y de flotación.

4.3 Nomenclatura de las variables

De acuerdo con la descripción del modelo y con las características y restricciones realizadas, en la **Tabla 7** se describen las principales variables a utilizar y su nomenclatura.

Símbolo	Definición	Unidad
Wd	Días programados de operación	día
Qpp	Capacidad de procesamiento de planta	t/día
Tp	Toneladas mineral propio	t
Tm	Toneladas mineral de compra	t
Lp	Ley mineral propio	g/t
Lm	Ley mineral de compra	g/t
Rp	Recuperación metalúrgica mineral propio	%
Rm	Recuperación metalúrgica mineral de compra	%
Aup	Finos oro mineral propio	kg u Oz
Aum	Finos oro mineral de compra	kg u Oz
Gp	Precio del oro	USD/Oz
Er	Tasa de cambio	COP
Cpp	Costos de tratamiento	USD/t
Cp	Costos mineral propio	USD/t
Cm	Costos mineral de compra	USD/t
Cv	Costos variables	USD/t
Cc	Costos de comercialización	USD
Pt	Porcentaje pagable por comercialización	%

Ei	Inversión inicial	USD
Ry	Regalías	%
Ep	Ingresos venta mineral propio	USD
Em	Ingresos venta mineral de compra	USD
Ea	Ingreso total anual	USD
Tc	Tasa de descuento	%
It	Impuesto sobre la renta	%
Up	Utilidad mineral propio	USD
Um	Utilidad mineral de compra	USD
Nu	Utilidad neta	USD
FCF	Flujo de caja libre	USD
VPN	Valor presente neto	USD
CEp	Margen rentable mineral propio	%
CEm	Margen rentable mineral de compra	%
Cn	Margen rentable total	%
In	Inflación	%

Tabla 7. Nomenclatura de las variables involucradas. Elaboración propia

4.4 . Modelo de evaluación financiera

El modelo de evaluación financiera como se mencionó en el apartado 4.1 se basa en la optimización del VPN teniendo en cuenta las variables determinadas en este mismo apartado, la idea es poder encontrar el punto máximo de beneficios del VPN. Las variables de entrada (inputs) consideradas son la compra de mineral y la extracción y explotación propia, precio del oro, tenor (g/t) y TRM.

Esta metodología permite analizar, con las variables antes mencionadas la proyección desde el año de base los ingresos, y ser proyectados a 10 años, obteniendo un valor automático, donde se calcula el valor presente neto y la tasa interna de retorno de la empresa.

En este caso, se han definido para la simulación una cantidad predefinida de iteraciones (n= 100.000), con las siguientes características:

- Se simula una cantidad de escenarios definidos Alpha, que son las variables predefinidas (tasa de recuperación compra y propia, precio del oro, tenor del mineral propio, tenor de compra y el valor de TRM)
- Para cada posible escenario se calcula el VPN, los valores obtenidos permite el análisis estadístico para decisiones futuras

- Se obtiene la media de los VPN obtenidos

Con base a los resultados obtenidos, se busca optimizar el valor esperado de VPN, de las variables de entrada. Tal como se describe en la **Figura 9**.

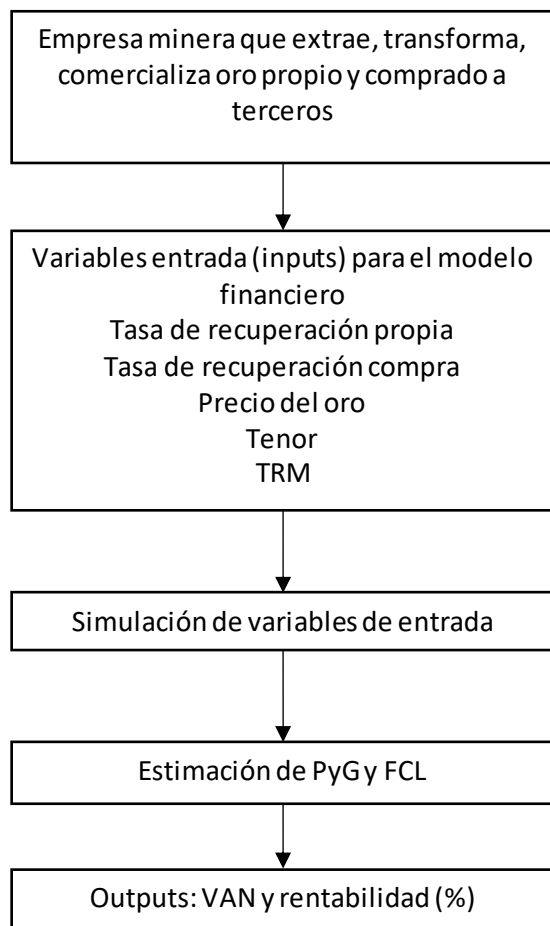


Figura 9. Metodología implementada para el diseño del modelo

4.5 Función objetivo

Con la apuesta del modelo definido, se busca obtener el punto de máxima optimización del VPN con respecto al objetivo definido que es la mayor rentabilidad posible para una empresa minera que extrae, beneficia y compra oro a terceros, cabe resaltar, que optar por usar un modelo de optimización busca maximizar las utilidades y beneficios económicos de un proyecto.

La función objetivo, permite obtener los mejores valores para las variables de decisión, en este caso permite la optimización del VPN, con un objetivo claro de encontrar las mayores utilidades a un lapso de 10 años y servir como herramienta útil para la toma de decisión de los inversionistas.

5. Validación del modelo propuesto

Conociendo ya el carácter del modelo definido en los apartados anteriores, este numeral busca realizar la aplicación de este, en una empresa minera que extrae, beneficia y compra mineral, teniendo de base los aspectos enumerados en el capítulo 4, los datos originales reflejados en la simulación son reales y tiene carácter de confidencialidad. Se desarrollaron dos análisis, el modelo estocástico de baja certidumbre basado en metodologías tradicionales y distribuciones uniformes y un modelo estocástico de alta certidumbre, los cuales se expondrán a continuación. Para la elaboración de dicho modelo se utilizó la herramienta *Risk simulator 2017*® extensión de *Microsoft Excel*®

5.1 Modelo estocástico de baja certidumbre

Este modelo es una proyección de baja incertidumbre, ya que no contempla fluctuaciones de las variables en el tiempo, por lo que se emplean distribuciones uniformes para realizar la simulación, esto con el fin de determinar una línea base en la proyección mediante valores constantes como las tasas de recuperación tanto propia como de compra, precio del oro, tenor en gramos por tonelada y con el valor promedio de la TRM para el año 2022. En la **Tabla 8** se enuncian los valores y las variables empleadas para la realización del modelo.

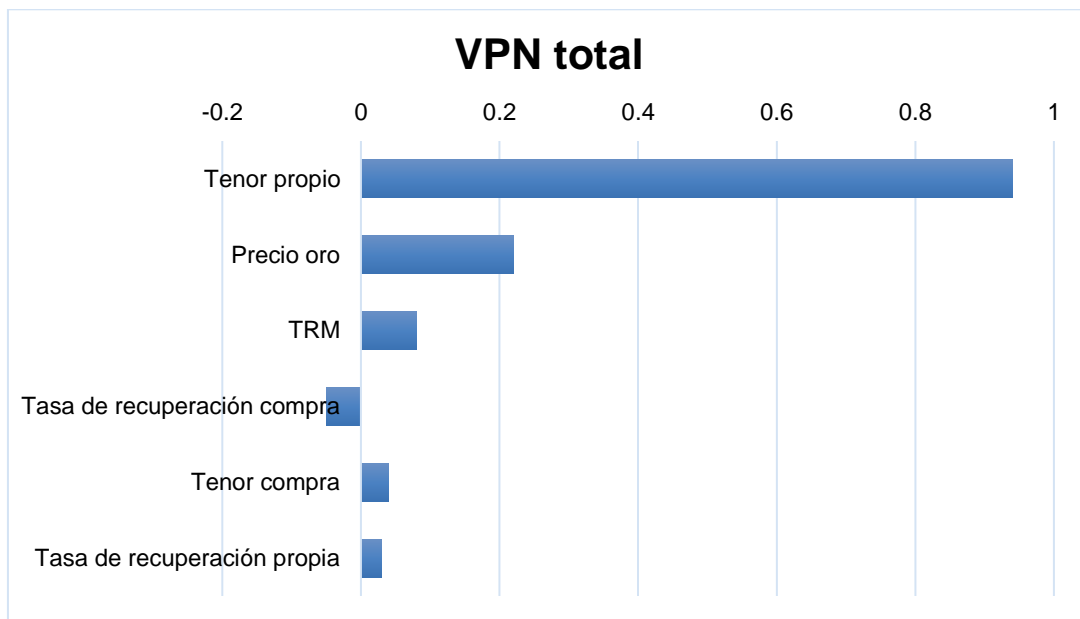
Símbolo	Entradas del modelo	Valor
Tm	Tasa de recuperación de compra	90%
Tp	Tasa de recuperación propia	98%
Gp	Precio de oro	1.803 USD/oz
Trp	Tenor propio	2,44 g/t
Trc	Tenor compra	11,54 g/t
TRM	TRM	4255.54 COP/USD
In	Inflación	3%
It	Impuesto sobre la renta	35%
Tc	Tasa de descuento	10%
Ry	Regalías	4%
Cm	Costos mineral de compra	38 USD/t
Cv	Costos variables	305 USD/t
Cc	Costos de comercialización	1.53%
Cp	Costos mineral propio	95 USD/t

Qpp	Capacidad de procesamiento de planta	1600 t/día
------------	--------------------------------------	------------

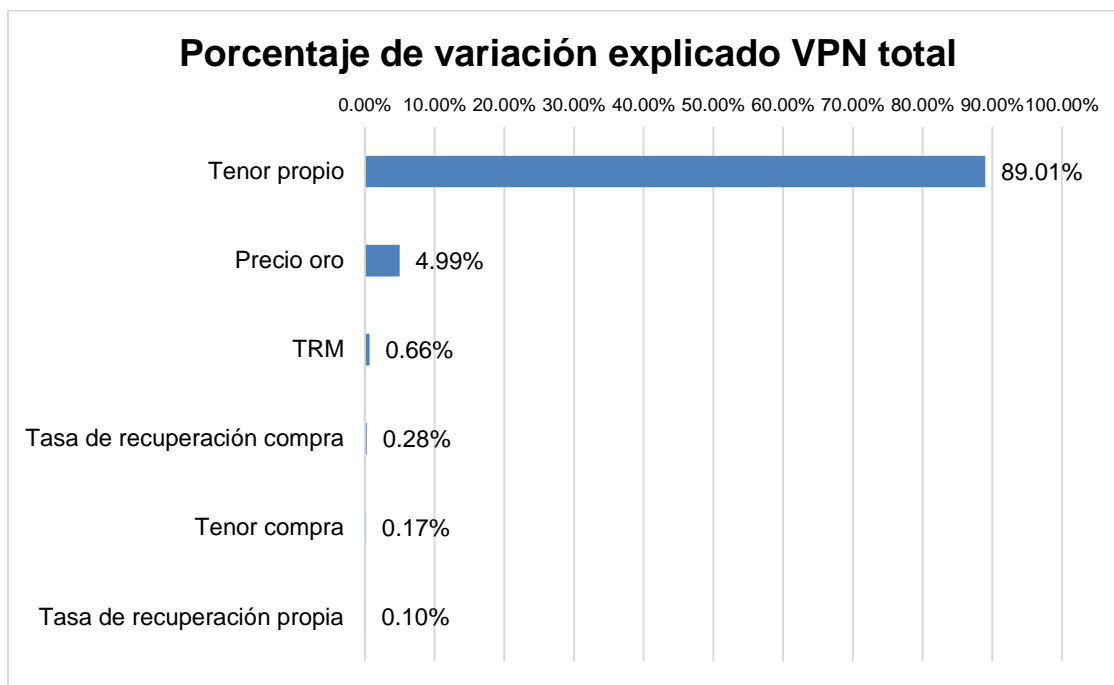
Tabla 8. Datos utilizados en el modelo de baja certidumbre

VPN total		Rentabilidad total	
Máximo	\$599,698,735,394 COP	Máximo	20.55%%
Mínimo	\$360,314,840,784 COP	Mínimo	-6.30%
Media	\$455,001,761,474 COP	Media	17.14%
Desviación	\$ 44,876,841,702 COP	Desviación	0.88

Tabla 9. Resultados de modelo de baja certidumbre



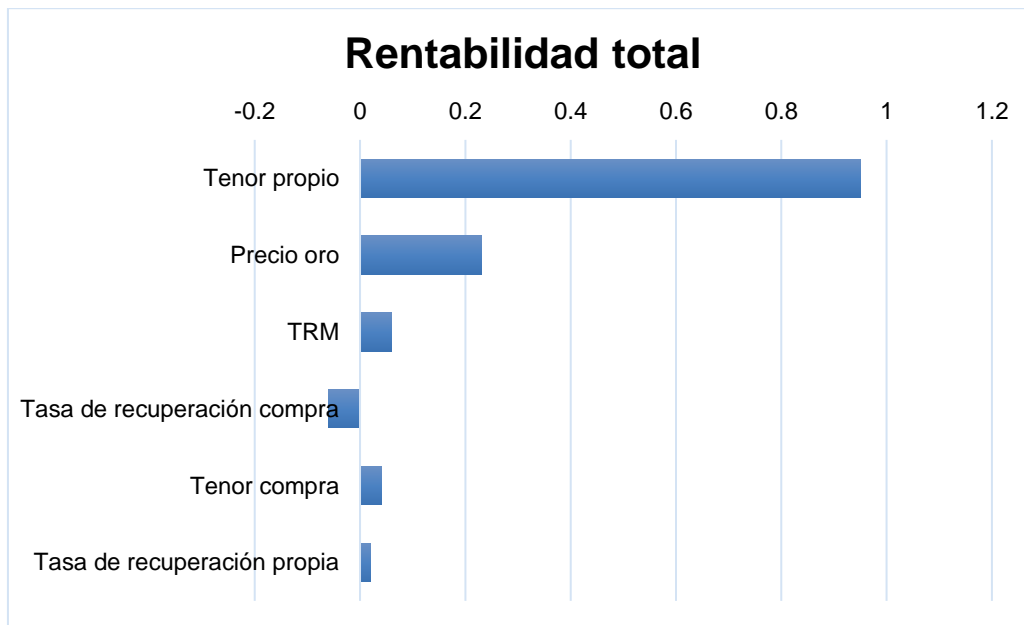
Gráfica 1. VPN Total modelo de baja certidumbre.



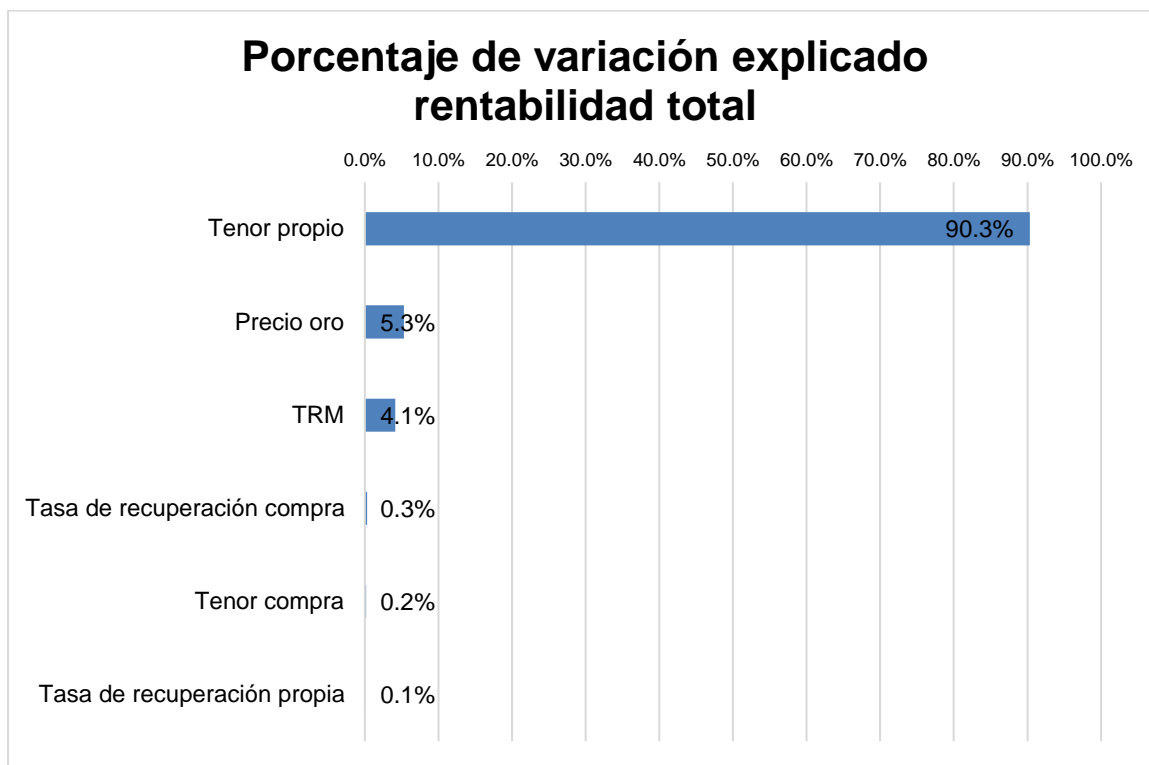
Gráfica 2. Porcentaje de variación explicado del VPN total

A partir de la Gráfica 1. VPN Total modelo de baja certidumbre., se observa que, de acuerdo con las variables consideradas en este estudio para el cálculo del VPN, se aprecia que la variable a la cuál este es más sensible es el tenor del mineral propio (0,94), en segundo lugar, el precio del oro (0,22) y en tercera instancia la TRM (0,08), sin embargo, también es importante mencionar que el tenor del mineral de compra y la tasa de recuperación también muestran sensibilidad del VPN. La primera variable enaltece la necesidad de mejorar la información proveniente del depósito respecto a exploración y tenor, además, desde el planeamiento minero determinar las zonas económicamente explotables que cumplan con el tenor de corte junto con la mejora en los procesos de extracción evitando la dilución del mineral extraído. Por otra parte, el mercado es fluctuante y el precio del oro no es ajeno a los fenómenos y macroeconómicos y situaciones geopolíticas, por eso representa un riesgo importante para operadores como inversionistas, ya que dependiendo de su comportamiento los proyectos pueden continuar, aumentar la capacidad de la operación y/o parar parcial o absolutamente. Finalmente se encuentra la TRM, la cual es una variable importante ya que no solo representa las ventas de los productos en un tipo de moneda local que cotiza en una moneda extranjera, sino, que también afecta directamente los costos operativos.

Por su parte, en la Gráfica 2 se aprecia la variación porcentual de las variables empleadas, donde la variable de mayor variación porcentual es el tenor del mineral propio con un 89,01% seguido del precio del oro con 4,99% y la TRM con 0.66%. También es relevante destacar que para el VPN los índices metalúrgicos de ambos tipos de minerales son importantes junto con el tenor del mineral comprado a terceros ya que de estos dependerá la calidad y cantidad del producto final y la capacidad de perfeccionar los procesos de recuperación en planta de beneficio teniendo en cuenta las propiedades metalúrgicas del mineral obtenido de terceros. Los resultados del modelo estocástico de baja certidumbre, expresados en la **Tabla 9** son los que servirán en comparación con el modelo estocástico. Se observa que la media del VPN y la rentabilidad total son \$455,001,761,474 COP y 17.14% respectivamente, en la proyección a 10 años con 100.000 iteraciones. También es apreciable que el negocio puede que no sea rentable ya puede arrojar pérdidas (valores negativos) ello debido a la incidencia de las variables mencionadas, además, que la empresa debe acordar plazos de pago adecuados a sus proveedores de mineral para conservar la liquidez y optar por opciones flexibles ante los cambios de los procesos macroeconómicos.



Gráfica 3. Rentabilidad total modelo de baja certidumbre



Gráfica 4. Porcentaje de variación explicado rentabilidad modelo de baja certidumbre.

Con respecto a la rentabilidad total, en las gráficas **Gráfica 3** y **Gráfica 4** se observa que el tenor del mineral propio, el precio del oro y la TRM son las más sensibles con un 0.95,, 0.23 y 0.06 de coeficiente de correlación respectivamente, las otras variables de entrada tuvieron un porcentaje < 0.014 que no afectan significativamente la proyección, adicionalmente, durante la prueba estas variables tuvieron un porcentaje de variación de 90,3%, 5,3% y 4,1% lo que explica que la rentabilidad es afectada por las variables de mercado y la calidad (tenor) del yacimiento.

Para los resultados del VPN propia, VPN compra, rentabilidad propia, rentabilidad compra, la información relacionada se encuentra en el anexo A y B.

5.2 Modelo estocástico de alta certidumbre

Se busco la optimización de las variables de entrada, las cuales fueron desarrolladas en el capítulo 4, los valores se expresan en la

Símbolo	Entradas del modelo	Valor
Tm	Tasa de recuperación de compra	90%
Tp	Tasa de recuperación propia	98%
Gp	Precio oro	2100 USD/Oz
Trp	Tenor propio)	2,44 g/t
Trc	Tenor compra	15,00 g/t
Trm	TRM	4500COP/USD
In	Inflación	3%
It	Impuesto sobre la renta	35%
Tc	Tasa de descuento	10%
Ry	Regalías	4%
Cm	Costos mineral de compra	38 USD/t
Cv	Costos variables	305 USD/t
Cc	Costos de comercialización	1.53%
Cp	Costos mineral propio	95 USD/t
Qpp	Capacidad de procesamiento de planta	1600 t/día

Tabla 10.

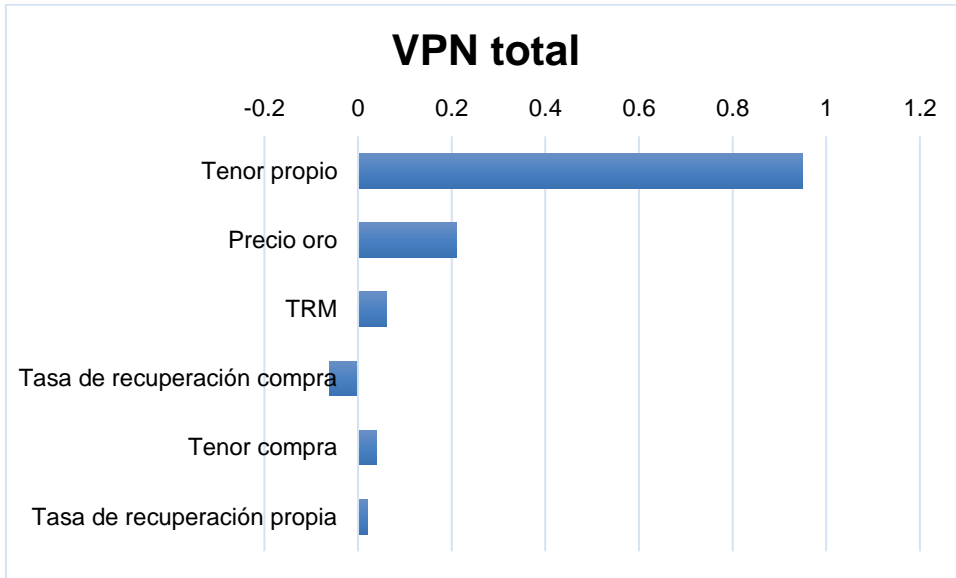
Símbolo	Entradas del modelo	Valor
Tm	Tasa de recuperación de compra	90%
Tp	Tasa de recuperación propia	98%
Gp	Precio oro	2100 USD/Oz
Trp	Tenor propio)	2,44 g/t
Trc	Tenor compra	15,00 g/t
Trm	TRM	4500COP/USD
In	Inflación	3%
It	Impuesto sobre la renta	35%
Tc	Tasa de descuento	10%
Ry	Regalías	4%
Cm	Costos mineral de compra	38 USD/t
Cv	Costos variables	305 USD/t
Cc	Costos de comercialización	1.53%
Cp	Costos mineral propio	95 USD/t
Qpp	Capacidad de procesamiento de planta	1600 t/día

Tabla 10 Datos utilizados en el modelo estocástico

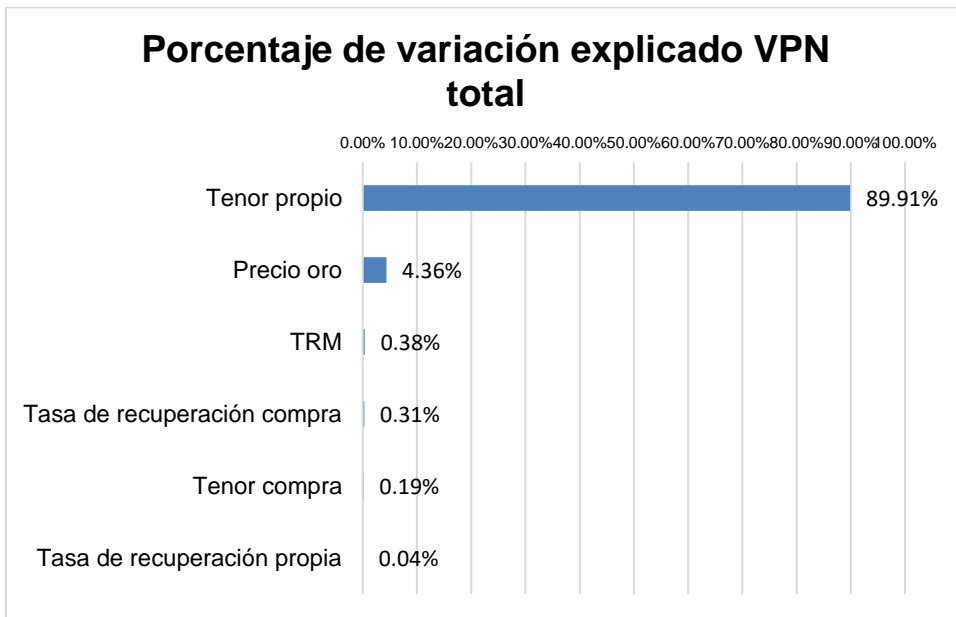
VPN total		Rentabilidad total	
Máximo	\$647,033,009,298 COP	Máximo	22.33%
Mínimo	\$346,538,204,908 COP	Mínimo	-3.40%
Media	\$470,007,251,400 COP	Media	18.33%%
Desviación	\$ 62,652,935,753 COP	Desviación	0.72

Tabla 11. Resultados del modelo estocástico de alta certidumbre

Se elaboró una simulación con una distribución triangular para las variables para el modelo estocástico obteniendolos siguientes resultados de la **Tabla 11**. Se observa que la media del VPN total y rentabilidad total son \$ 470,007,251,400 COP y 18.33%% respectivamente, en el análisis de sensibilidad, el VPN total fue afectado por el tenor del mineral propio, el precio del oro y la TRM en mayor medida (coeficientes de 0,95, 0,21 y 0,06) como se evidencia en la **Gráfica 5** reflejando unos resultados similares al del modelo estocástico de baja certidumbre, lo que representa que el VPN tanto en el modelo estocástico de baja certidumbre como en el estocástico de alta certidumbre se encuentra influenciado en mayor medida por las variables exógenas (variables de mercado) y las propiedades intrínsecas del yacimiento. Además, el porcentaje de variación de estas mismas variables fue de 89,91%, 4,36% y 0,38% como se observa en la **Gráfica 6**. No obstante, es necesario tener en cuenta que los índices metalúrgicos también tienen un efecto en el VPN total, por lo que es necesario continuar realizando estudios para mejorar los procesos de recuperación y caracterizar los diferentes tipos de minerales obtenidos por la compra a terceros.

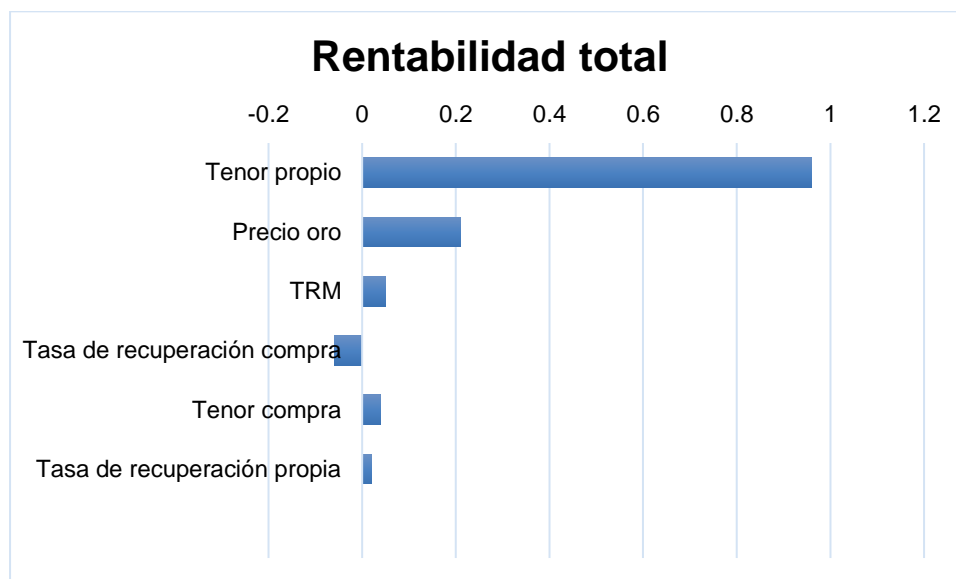


Gráfica 5. VPN total del modelo estocástico de alta certidumbre

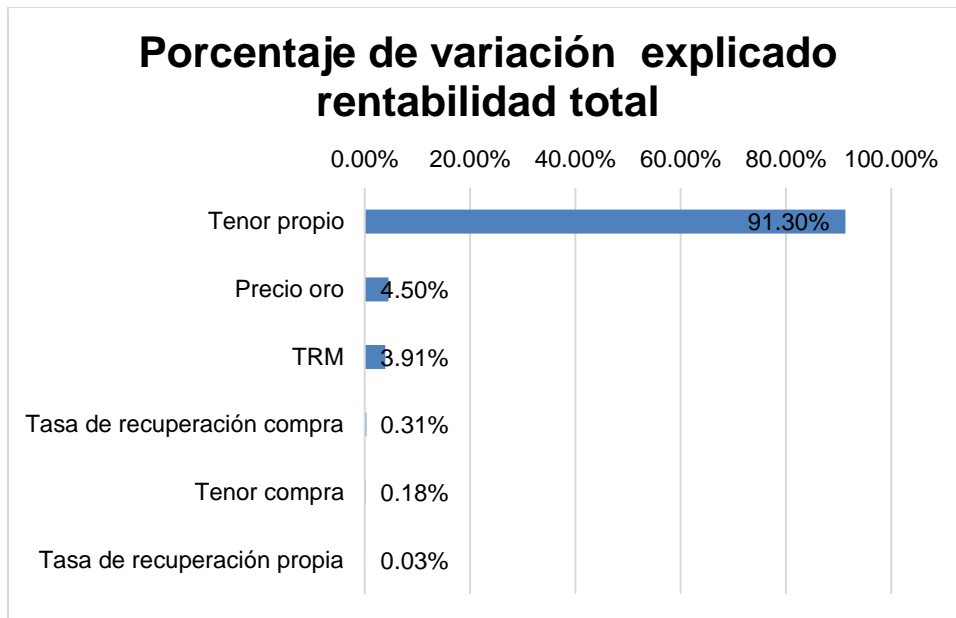


Gráfica 6. Porcentaje de variación explicado del VPN total del modelo estocástico de alta certidumbre.

En el caso de la rentabilidad total, se observa que las variables antes mencionadas (Tenor del mineral propio, el precio del oro y la TRM) son las más sensibles con un 0,96, 0,21 y 0,05 de coeficiente de correlación, de igual su variación porcentual fue de 91,30%, 4,50% y 3,91% como se observan en las gráficas **Gráfica 7** y **Gráfica 8** . Por otra parte, las variables de recuperación de mineral propio y tenor de compra tuvieron un coeficiente de 0,04 y 0,02 lo que permite determinar que la rentabilidad total del modelo es sensible a la recuperación del mineral propio dado su bajo tenor y que la cantidad de oro aportada por el mineral de terceros es importante para mejorar la calidad del mineral que se alimenta a planta de beneficio y los resultados finales del proceso de transformación. Sin embargo, también posible que el modelo arroje pérdidas, ante este escenario, es necesario que se evalúen diferentes situaciones que permitan contrarrestar los fenómenos externos y desde la gerencia, coordinar con su parte operativa las decisiones de explotación y planeamiento para evitar estas cifras negativas.



Gráfica 7. Rentabilidad total del modelo estocástico de alta certidumbre



Gráfica 8. Porcentaje de variación explicado rentabilidad total del modelo estocástico de alta certidumbre

Los resultados obtenidos de la VPN propio, VPN compra, rentabilidad propia, rentabilidad compra, se puede consultar en el **anexo C y D**.

6. Resultados y conclusiones

Los datos suministrados en las **tablas Tabla 9 y Tabla 11** permiten observar que, al comparar los resultados para la VAN se encuentra que la media del modelo estocástico de baja certidumbre con respecto a la media del modelo estocástico de alta certidumbre es

menor y que este último genera mayores ganancias con una diferencia de \$129,691,483,995 COP respecto al primer modelo. De esta forma, el segundo modelo tiene varios beneficios ya que al emplear distribuciones de probabilidad triangular para las variables de entrada, la simulación permite determinar el máximo de ganancias que en el caso del comparativo sería de \$47,334,273,904 COP, no obstante, si el modelo de alta certidumbre incurriera en los escenarios más pesimistas, el primer modelo generaría mayores ganancias, pero, es de tenerse en cuenta que al ser un modelo con distribuciones uniformes no permite identificar cuáles van a ser las que más tienen injerencia y a la empresa tomar decisiones respecto al modelo de compra, beneficio y comercialización.

También se identificó que, de acuerdo con las condiciones comerciales, los costos operativos y las capacidades de producción, las variables de mercado y la calidad del yacimiento juegan un papel fundamental. Cómo se observó en ambos modelos, el tenor del mineral propio, el precio del oro y la TRM son las variables de mayor injerencia en el VPN y la rentabilidad. Por lo tanto, esto significa que, para el caso de estudio realizado, la empresa debe procurar realizar mejores procesos de exploración, muestreo, planeamiento minero y control de la dilución en sus procesos extractivos para lograr obtener mineral por encima del tenor de corte. Además, realizar rigurosos estudios de mercado para tomar decisiones financieras, ya que el precio del oro es la segunda que más afecta el modelo propuesto y es riesgosa tanto para los operadores como para los inversionistas dada su volatilidad y susceptibilidad a condiciones económicas y situaciones geopolíticas. También se añade que la TRM es crucial ya que no solamente representa una transacción en una moneda local de producto que se comercializa en una moneda extranjera, sino que también afecta directamente los costos operativos. También, se observó que las variables metalúrgicas del mineral propio y el tenor del mineral de compra influyen en el VPN, de esta forma, la cantidad de oro que se puede extraer del proceso de beneficio y por lo tanto para comercialización depende de que la planta funcione bajo condiciones óptimas de trabajo en los días programados y que la empresa minera desarrolle procesos de innovación y desarrollo para mejorar las variables metalúrgicas y captar mineral de terceros de otros ambiente geológicos conservando los índices apropiados de recuperación. Ante la situación anterior, si la empresa minera decide conservar la mayor capacidad instalada de procesamiento, podría contemplar los siguientes panoramas: el primero de mejorar la dilución de los procesos de extracción provocando un aumentando en la ley del mineral propio, pero disminuyendo su tonelaje y aumentar la captación de mineral de terceros,

mientras que el segundo escenario, es aquel en el cual la empresa debe captar mineral de terceros superior con una ley superior 15 gr/t. Los escenarios anteriores son fundamentales para identificar posibilidades de expansión, generación de mayores patios de acopio e identificar riesgos en futuros procesos de inversión.

Con respecto a la rentabilidad total, ambos modelos tiene una media de rentabilidad similar (17,14%MBC y 18,33%MAC), sin embargo, la rentabilidad máxima en el modelo de alta certidumbre es superior que en el modelo baja, y en un lapso de 10 años como se realizó la simulación permite controlar las posibles variables que más afectarían la rentabilidad, es decir, el tenor del mineral propio, el precio del oro y la TRM, adicional, es importante mencionar que el modelo de baja certidumbre tiene distribuciones uniformes y que probablemente por eso no refleja tanta variación en la rentabilidad como lo hace el modelo estocástico de alta certidumbre. Además, al analizar las rentabilidades de ambos negocios por forma separada en el modelo de alta certidumbre se observa que la rentabilidad del mineral propio es de 14,66% mientras que la del mineral de compra fue de 23,76% lo que significa que el negocio de compra es rentable bajo los estándares actuales de aprehensión. Sin embargo, la empresa podría contemplar la flexibilidad de aumentar la captación o modificar los estándares de calidad para obtener un mineral de mayor ley. Es de tener en cuenta que la rentabilidad se evaluó en diferentes escenarios como se expone en capítulo 5.2 en el modelo estocástico de alta certidumbre escogido generando variaciones y fluctuaciones en ambientes controlados, que permite determinar las mayores rentabilidades.

Dada la rentabilidad del negocio de compra de mineral, se evidencia que el aporte del sector minero formal de mediana y pequeña minería es relevante a la empresa, además, de que el porcentaje pagado considerado por el modelo oscila entre un 62% y 65% respecto al precio de la onza, valor que no es menor, teniendo en cuenta que, en su mayoría, estos proveedores no poseen sistemas de gestión técnica, financiera ni ambiental y que el mineral se comercializa desde su extracción y estancia en bocamina. De esta forma, la empresa minera podría garantizar el suministro e incentivar al minero formal mediante los siguientes procesos:

1. **Contratos a largo plazo:** con precios fijos en el tiempo, de acuerdo con las condiciones de mercado y evitar efectos negativos de la variación en el precio del oro y de la TRM. Además de generar acuerdos de flujos determinados de mineral en calidades y cantidades.
2. **Acompañamiento técnico:** Acuerdos con los proveedores para mejorar sus condiciones de seguridad y salud en el trabajo y el aumento de las productividades.
3. **Formalización minera:** la empresa minera puede llevar a cabo procesos legislativos para formalizar a aquellos pequeños mineros que trabajen de forma ilegal en sus títulos y mediante las figuras de subcontratos de formalización y/o contratos de operación crear acuerdos a largo plazo con precios fijos en el tiempo, de acuerdo con las condiciones de mercado y evitar efectos negativos de la variación en el precio del oro y de la TRM. Además de generar acuerdos de flujos determinados de mineral en calidades y cantidades.

En resumen, el modelo propuesto refleja una alta sensibilidad hacia las condiciones intrínsecas del yacimiento y luego hacia los parámetros de mercado y por último a los operativos, no obstante, al tratarse de los datos reales de una empresa minera, el analista podrá modificar los mismos de acuerdo con los escenarios o supuestos bajo los cuales podrían darse diferentes situaciones e incorporar otros modelos econométricos. Para los resultados del modelo actual, es primordial para la empresa minera genere adecuados procedimientos de exploración para obtener información fidedigna sobre la calidad del yacimiento, realizar un planeamiento minero que permita obtener mineral con tenores superiores a la ley de corte y mejorar los procesos de dilución, hacer estudios de mercado y financieros que permitan obtener flexibilidad ante los cambios macroeconómicos, garantizar la operatividad de su planta de beneficio, generar el flujo constante del mineral de compra mediante el fomento y acuerdos comerciales y realizar procesos de investigación que le permitan incrementar sus índices metalúrgicos para obtener un mayor volumen de mineral comercializable.

7. Trabajos futuros

Para finalizar esta entrega, teniendo en cuenta los resultados del modelo, se proponen las siguientes ideas para futuros proyectos:

1. El modelo no contó con análisis de depreciación, se recomienda tener esta variable para proyectos similares con el propósito de complementar las variables utilizadas. Además, considerar el impuesto al oro, rubro que es tenido en cuenta para los explotadores y liquidadores de oro pertenecientes a Reconocimientos de Propiedad Privada (RPP).

2. Realizar este mismo tipo de modelos para compra, beneficio y venta de minerales polimetálicos, además, que se complemente el modelo que incluya la incertidumbre geológica del depósito de la empresa que extrae y capta mineral, y la incertidumbre metalúrgica de beneficiar diferentes metales y las variables del mercado.
3. Es de tener en cuenta que para este trabajo solo se contó con un único sitio de acopio y beneficio, además, que el modelo solo contempló una inversión inicial, como capital de trabajo, por lo que se sugiere considerar una inversión para el montaje de diferentes sitios de acopio y beneficio cerca de distritos mineros estratégicos, que permita la aprehensión de minerales provenientes de diferentes ambientes geológicos, la evaluación individual y conjunta de cada una de estas operaciones. Adicionalmente, es una forma de promover la compra de mineral a pequeños productores cuyo músculo financiero no es robusto para realizar procesos de exploración, extracción y beneficio.
4. De acuerdo con las variables macroeconómicas utilizadas es de tener en cuenta que el modelo de evaluación planteado permite ser la puerta de entrada para próximas investigaciones donde se incluyan otros escenarios, por ejemplo, contemplar cambios en las políticas tributarias y la normativa vigente. Los anterior, ya que políticas de gobierno pueden alterar la dinámica económica de las empresas mineras, a partir de reformas tributarias, pago de regalías y otras normas que generen un impacto fiscal y puedan acarrear inestabilidad en la explotación, compra y venta de recursos minerales, especialmente el oro, acá es donde juega un papel crucial contar con modelos de evaluación financiera mucho más robustos, donde se tengan en cuenta muchas más variables para dar confianza en propio sector minero colombiano.

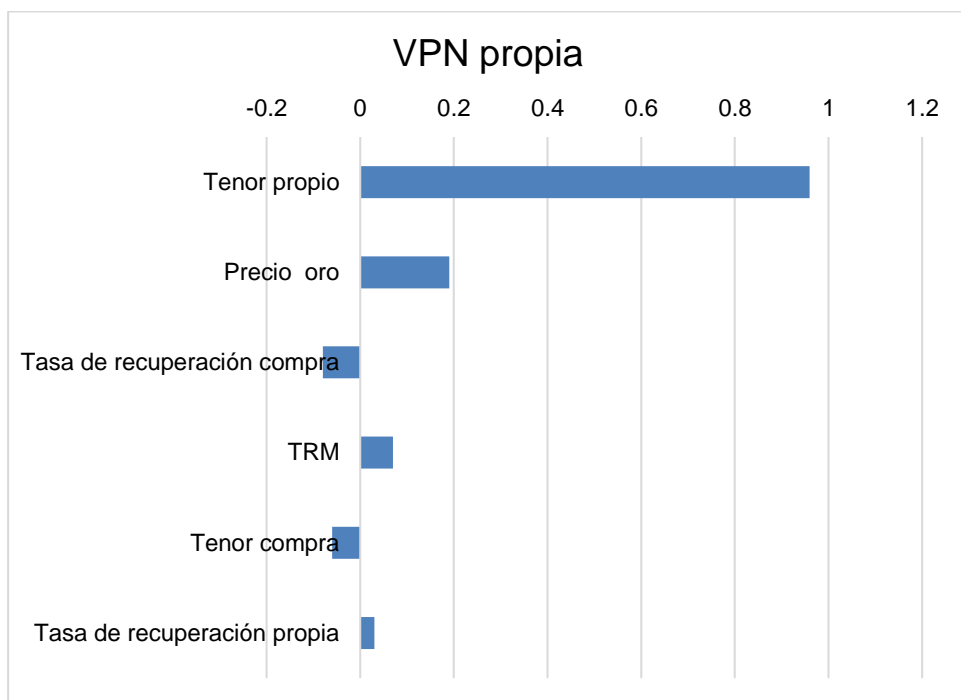
Anexos

Anexo A

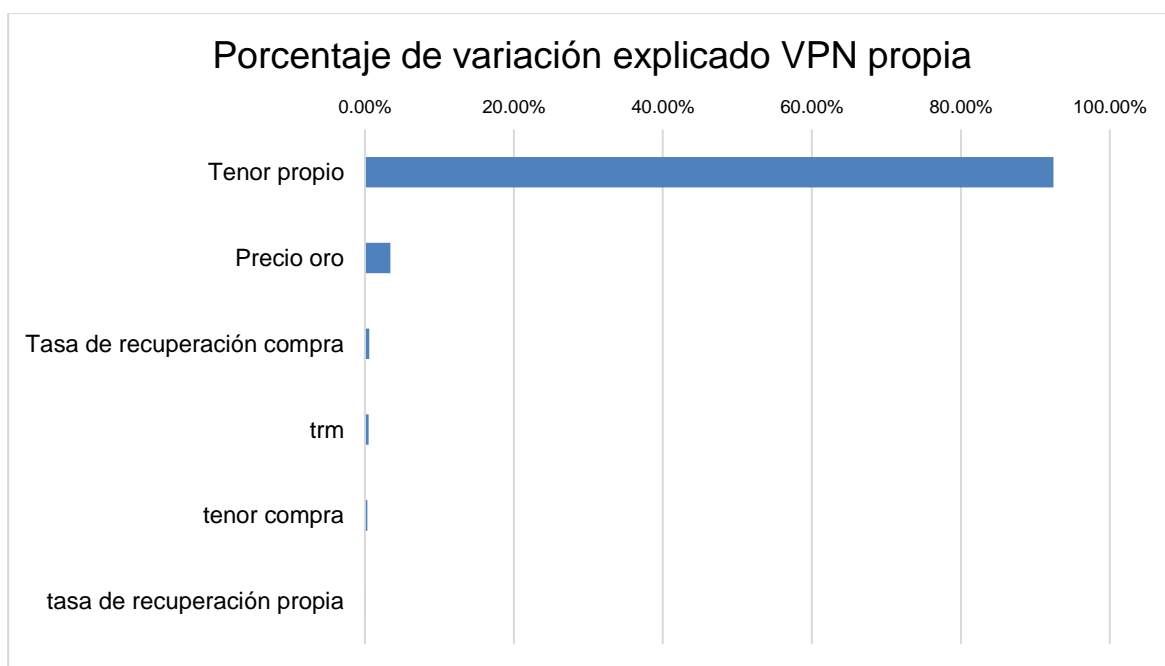
En la **Tabla 12** **Tabla 12**. Resultados VPN y rentabilidad propia modelo se observa el resultado obtenido en la simulación del VPN y rentabilidad propia en el modelo de baja certidumbre, además, sus correspondientes gráficos (9,10,11 y 12).

VPN propia		Rentabilidad propia	
Media	\$271,282,444,451 COP	Media	13.72%%
Máxima	\$314,069,133,187 COP	Máxima	16.12%
Mínima	\$256,673,722,580 COP	Mínima	-3.19%
Desviación	\$14,698,748,633 COP	Desviación	0.1177

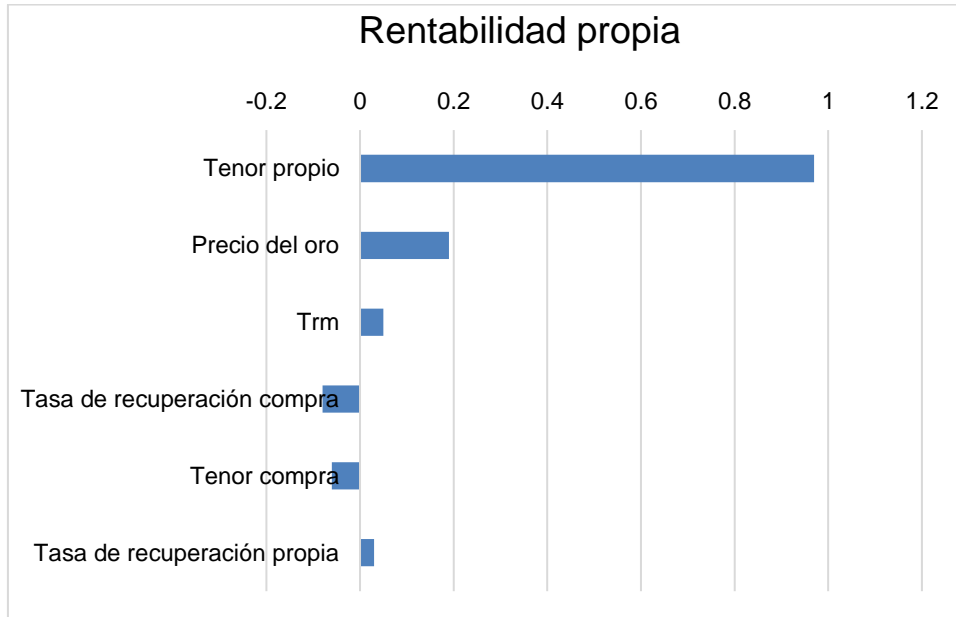
Tabla 12. Resultados VPN y rentabilidad propia modelo estocástico de baja certidumbre



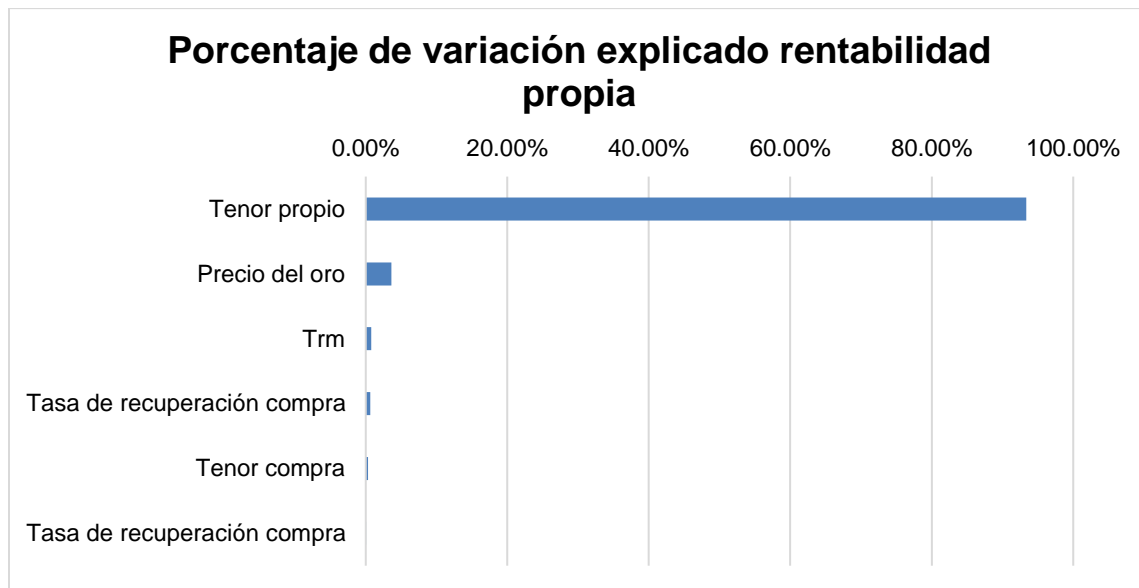
Gráfica 9. VPN propia del modelo de baja certidumbre



Gráfica 10. Porcentaje de variación explicado VPN propia.



Gráfica 11. Rentabilidad propia modelo estocástico de baja certidumbre.



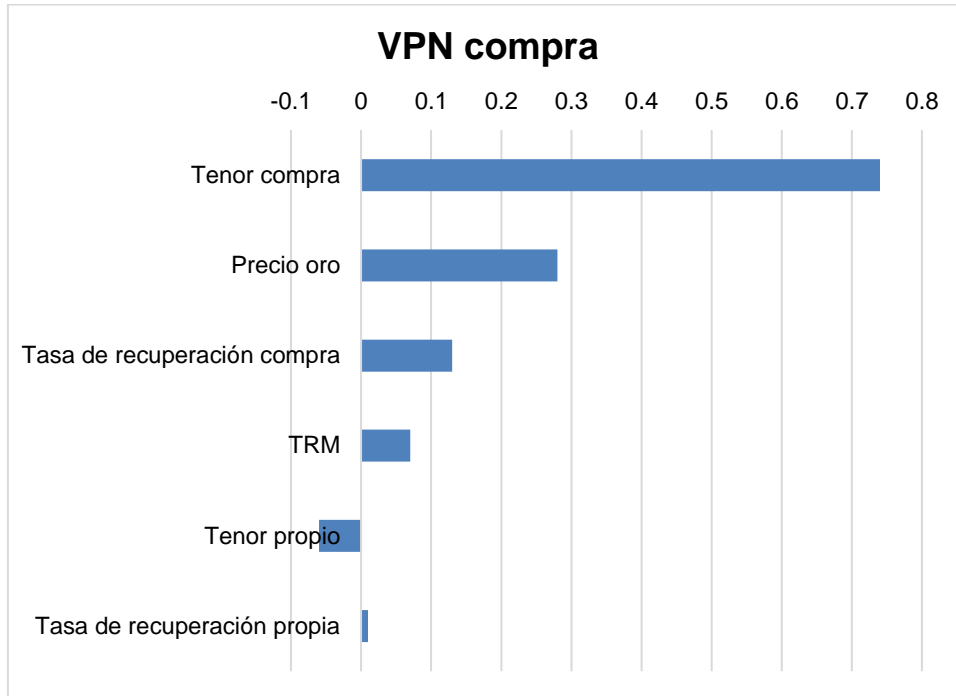
Gráfica 12. Porcentaje de variación explicado rentabilidad propia modelo estocástico de baja certidumbre

Anexo B

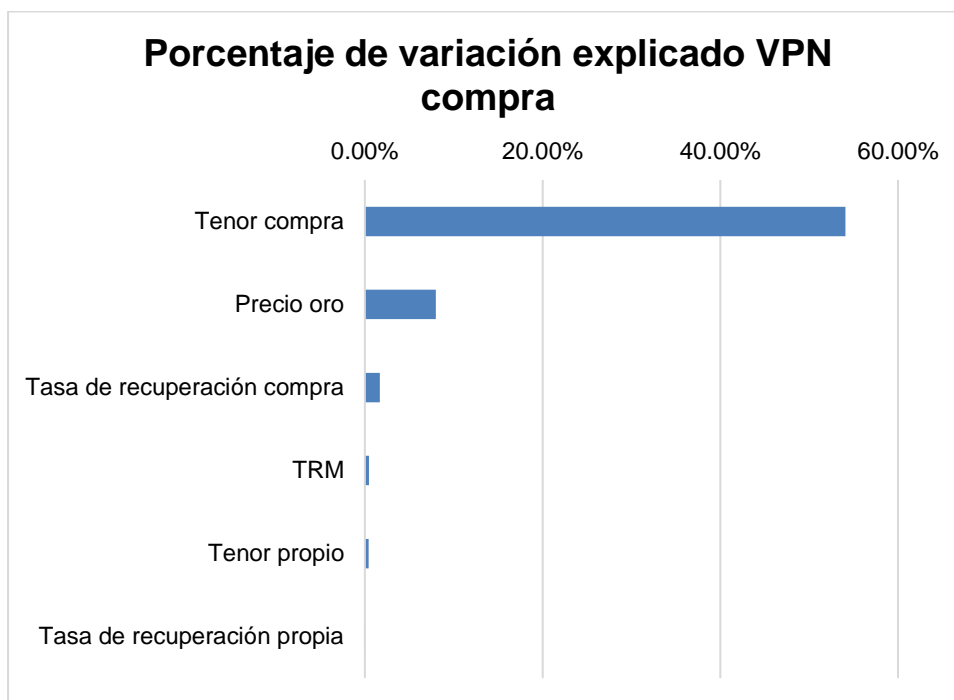
En la **Tabla 13**, se observa el resultado obtenido del VPN y la rentabilidad compra del modelo de baja certidumbre, adicional, las gráficas del análisis de sensibilidad (gráficas 13,14,15 y 16).

VPN compra		Rentabilidad compra	
Media	\$ 103,513,510,747 COP	Media	22.14%
Máxima	\$ 124,590,272,339 COP	Máxima	25.28%
Mínima	\$ 78,046,994,473 COP	Mínima	23.12%
Desviación	\$ 6,356,162,455 COP	Desviación	0.0056

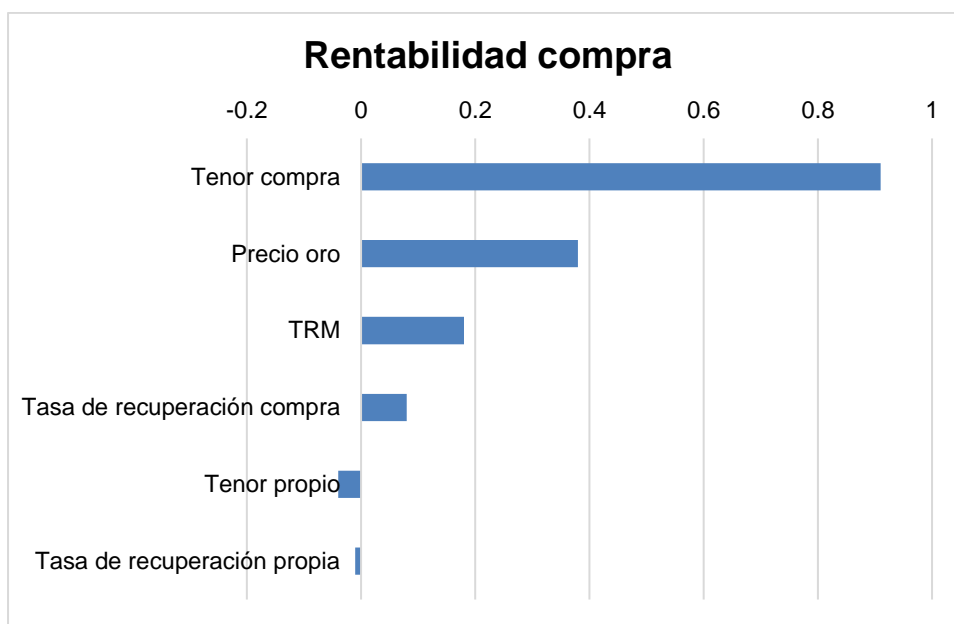
Tabla 13. Resultados VPN y rentabilidad compra modelo estocástico de baja certidumbre



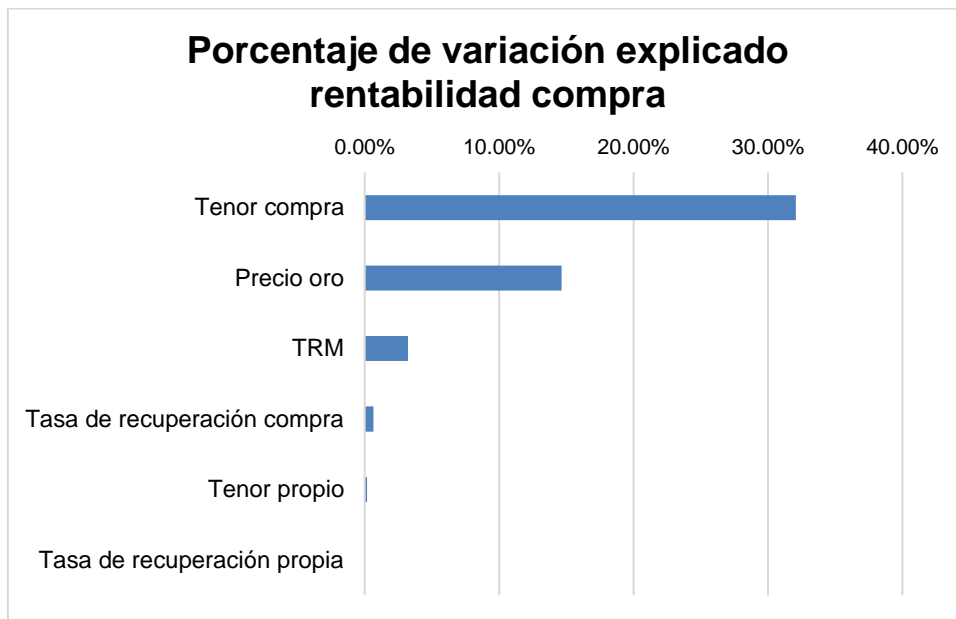
Gráfica 13. VPN compra modelo de baja certidumbre



Gráfica 14. Porcentaje de variación explicado VPN compra modelo de baja certidumbre.



Gráfica 15. Rentabilidad compra modelo de baja certidumbre.



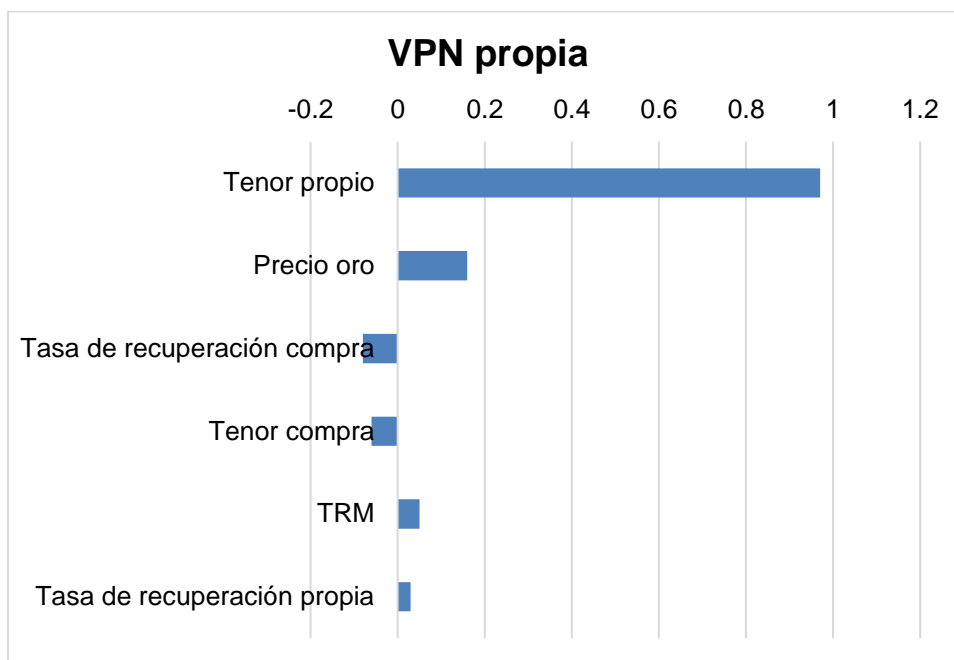
Gráfica 16. Porcentaje de variación explicado rentabilidad compra modelo de baja certidumbre

Anexo C

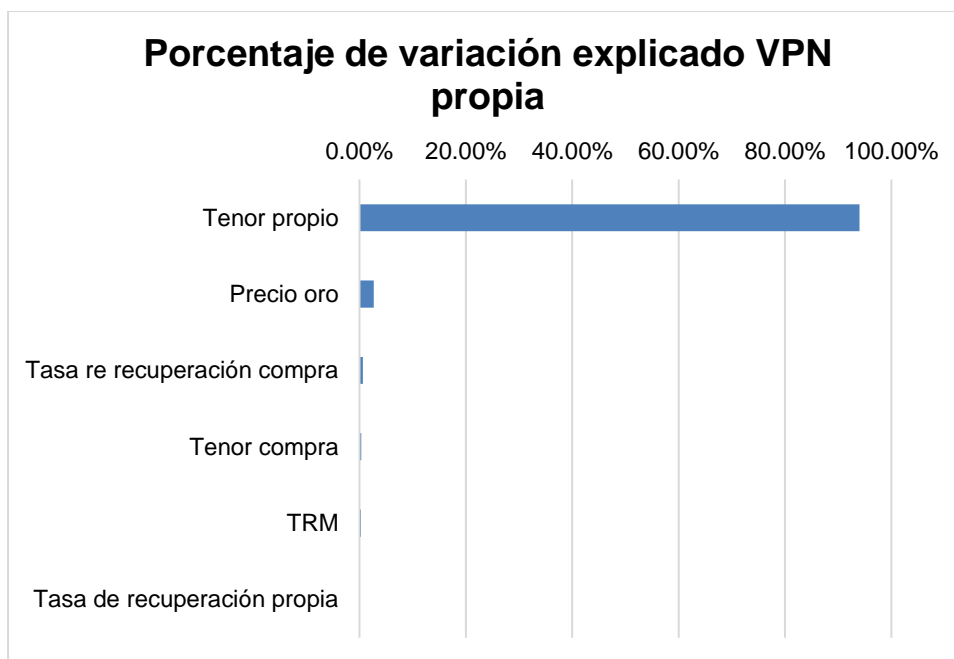
En la **Tabla 14**, se observa los resultados obtenidos del VPN y la rentabilidad propia del modelo estocástico, adicional, las gráficas del análisis de sensibilidad (17,18,19,20)

VPN propia		Rentabilidad propia	
	\$ \$286,792,969,565		
Media	COP	Media	14.66%
Máxima	\$ \$345,542,806,868 COP	máxima	18.87%%
Mínima	\$ \$261,996,177,590 COP	mínima	-3.80%%
Desviación	\$ 15,096,908,776 COP	Desviación	0.1067

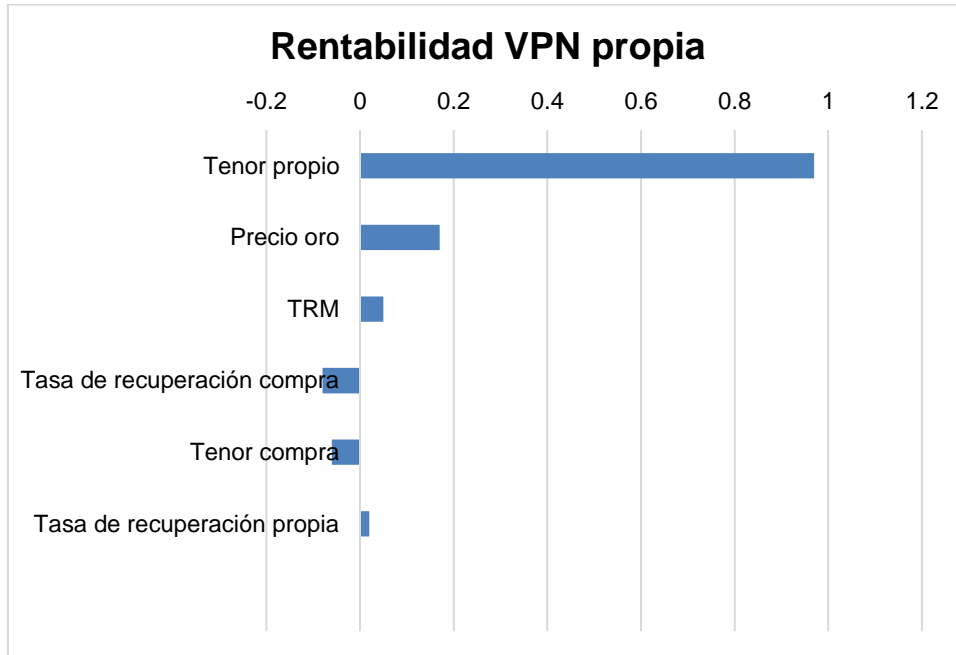
Tabla 14. Resultados VPN y rentabilidad propia modelo estocástico de alta certidumbre



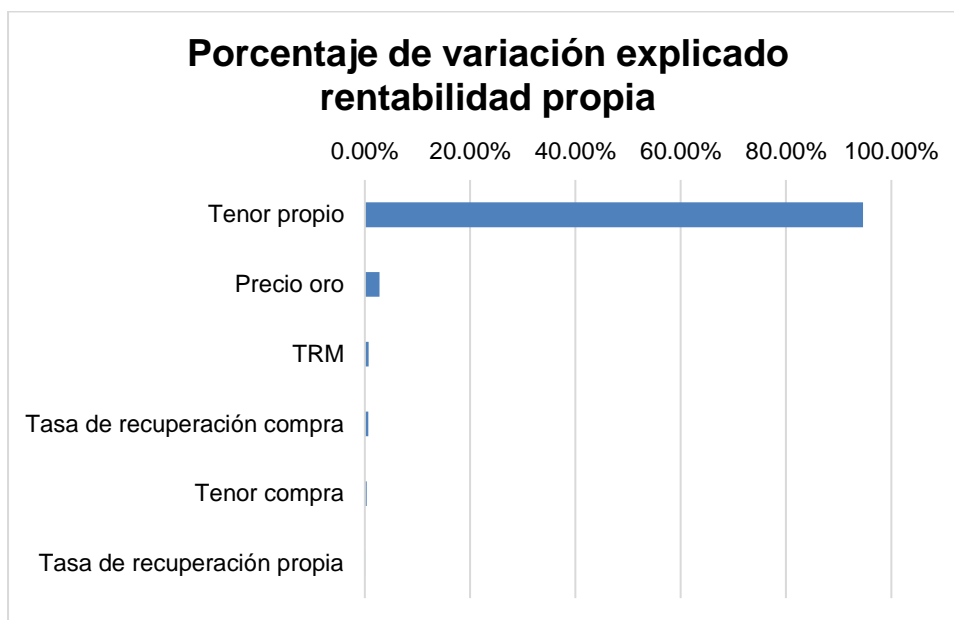
Gráfica 17. VPN propia modelo estocástico de alta certidumbre



Gráfica 18. Porcentaje de variación explicado VPN propia modelo estocástico de alta certidumbre.



Gráfica 19. Rentabilidad VPN propia modelo estocástico de alta certidumbre



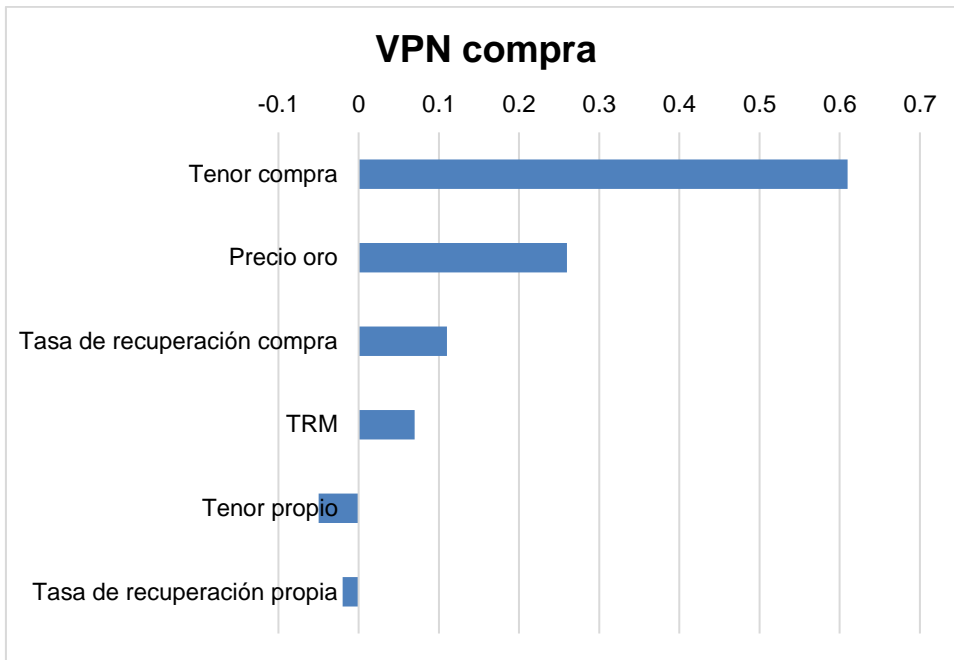
Gráfica 20. Porcentaje de variación explicado rentabilidad propia modelo estocástico de alta certidumbre

Anexo D

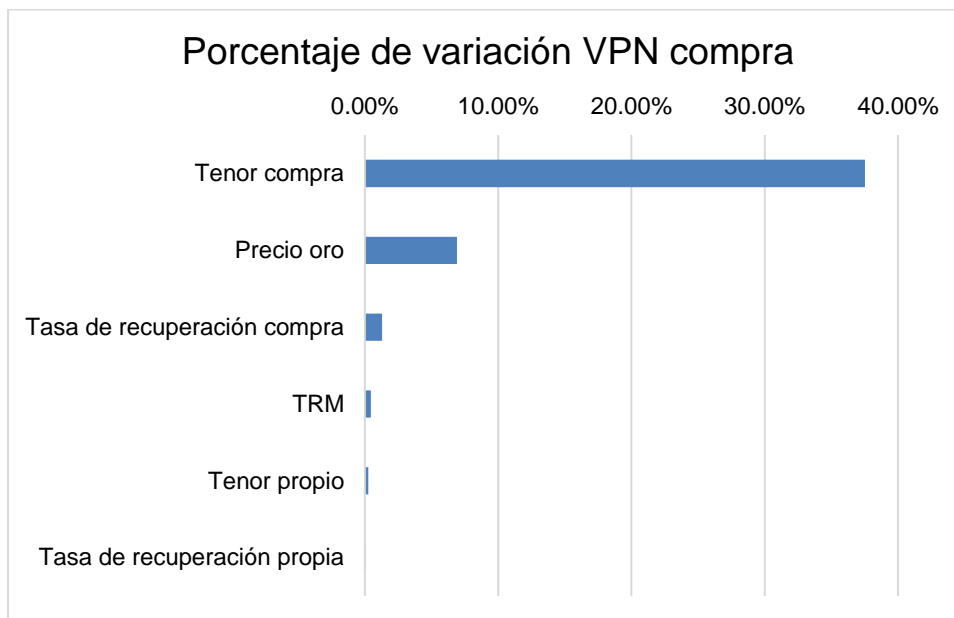
En la **Tabla 15****Tabla 13**, se observa el resultado obtenido del VPN y la rentabilidad compra del modelo de alta certidumbre, adicional, las gráficas del análisis de sensibilidad (21,22,23 y 24).

VPN compra		Rentabilidad compra	
Media	\$ 98,495,678,945 COP	Media	23,76%
Máxima	\$ 140,347,555,329 COP	Máxima	28.88%
Mínima	\$ 61,278,584,196 COP	Mínima	19.11%
Desviación	\$ 9,233,041,997 COP	Desviación	0.0048

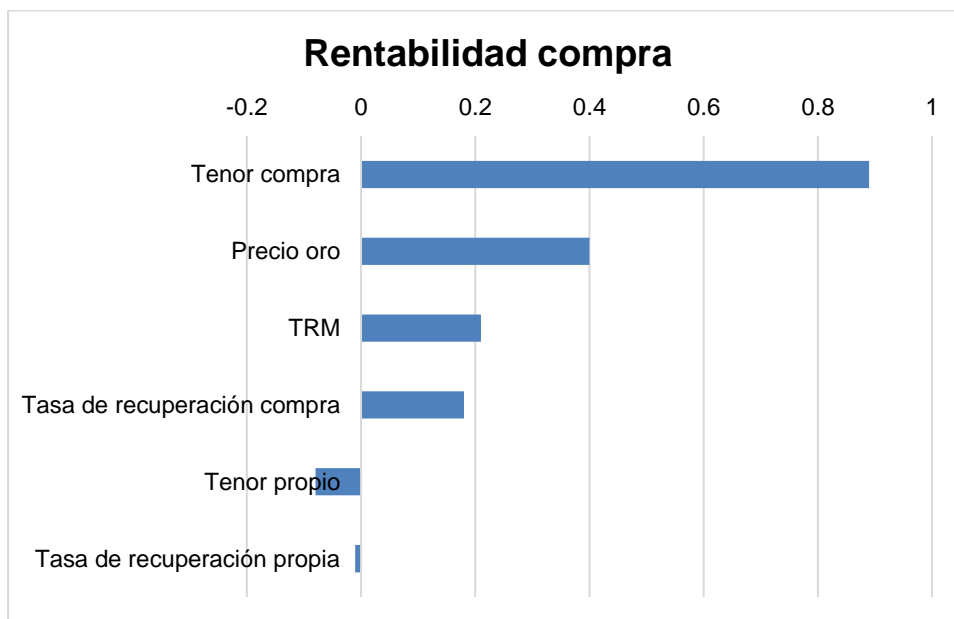
Tabla 15. VPN y rentabilidad compra modelo estocástico de alta certidumbre



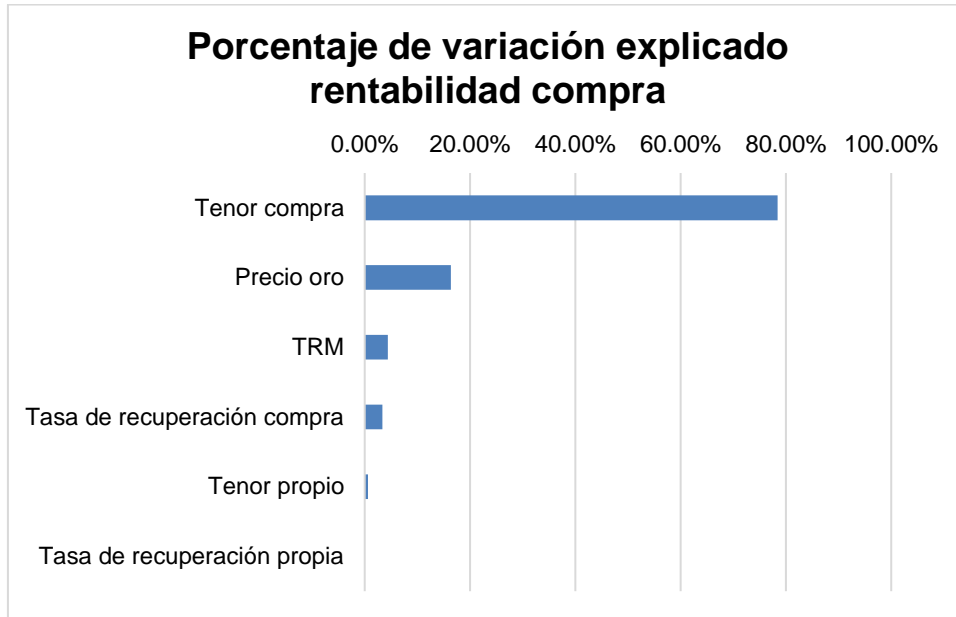
Gráfica 21. VPN compra modelo estocástico de alta certidumbre



Gráfica 22. Porcentaje de variación VPN compra modelo estocástico de alta certidumbre



Gráfica 23. Rentabilidad compra modelo estocástico de alta certidumbre



Gráfica 24. Porcentaje de variación rentabilidad compra modelo estocástico de alta certidumbre

Bibliografía

- [1] J. Ridley, *Ore deposits geology*, 1st ed., vol. 53, no. 9. Edinburgo: Cambridge University press, 2013. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [2] Ministerio de Minas y Energía, *Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, relacionado con la clasificación de la minería*. Colombia, 2016, pp. 1–4.
- [3] F. S. Morales, “Evaluación geoestadística por medio del método de condicionamiento uniforme para un caso de estudio de un yacimiento de oro localizado en el departamento de Antioquia, Colombia,” Universidad Nacional de Colombia, 2019. doi: 10.31819/9783964564405-toc.
- [4] Y. L. Mamani Chui, “Ventajas y beneficios del sistema de trazabilidad para la comercialización y exportación de oro en el Proyecto Minero Francisco Uno,” *Universidad Nacional del Altiplano*, Jan. 2020, Accessed: Oct. 22, 2021. [Online]. Available: <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/14999>
- [5] A. Mendiola, C. Aguirre, C. Del Castillo, M. Ccopa, L. Flores, and R. Ortiz, *Gerencia para el Desarrollo 34: Valoración de una empresa con opciones reales: el caso de Minera Aurífera Peruana*, 1st ed. Lima: Universidad ESAN, 2014. Accessed: Jan. 17, 2022. [Online]. Available: https://repositorio.esan.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12640/126/Gerencia_para_el_desarrollo_34.pdf
- [6] L. Berrio, “Impacto de las NIF’S en la evaluación financiera de proyectos y la gestión de riesgos.,” EAFIT, Medellín, 2020. Accessed: Feb. 21, 2023. [Online]. Available: https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/27470/LeidyJohana_BerrioU_suga_2021.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- [7] Urieta Gómez; Emiro Andrés, “Valoración financiera bajo incertidumbre de un proyecto minero de agregados pétreos,” Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2021.
- [8] J. A. Botín, M. F. Del Castillo, R. R. Guzmán, and M. L. Smith, “Real options: a tool for managing technical risk in a mine plan,” *SME Annual meeting*, pp. 1–7, Feb. 2012.
- [9] R. G. Dimitrakopoulos and S. A. Abdel Sabour, “Evaluating mine plans under uncertainty: Can the real options make a difference?,” *Resources Policy*, vol. 32, no. 3, pp. 116–125, Sep. 2007, doi: 10.1016/j.resourpol.2007.06.003.
- [10] World Gold Council, “La contribución social y económica de la minería de oro,” 2021. [Online]. Available: www.stewardredqueen.com

- [11] Anglo Gold Ashanti, *El oro: todo lo que debe saber en 100 preguntas*, 1st ed., vol. 1. Bogotá: Anglo Gold Ashanti, 2014.
- [12] R. Batterham and R. Elvish, "Smarter mineral processing, or, what do mill operators think?," in *10th Mill Operators' Conference Proceedings 2009–1*, Adelaide, Australia: perators think? In: 10th Mill Operators' Conference Proceedings 2009–1.1 Abstract. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2009.
- [13] C. M. Rule, R. J. Fouchee, and W. C. E. Swart, "Run of mine ore upgrading–proof of concept plant for XRF ore sorting," in *Proceedings of the 6th International Conference on Semi-Autogenous and High Pressure Grinding Technology*, 2015.
- [14] Unidad de Planeación Minero Energética, "Aproximación al diagnóstico del sector minero aurífero en Colombia," Bogotá D.C., 2021. [Online]. Available: <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/Publicaciones.aspx>
- [15] U.S. Geological Survey, "Gold," Jan. 2023. Accessed: Feb. 25, 2023. [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-gold.pdf>
- [16] "Gold Demand & Supply by Country | World Gold Council." Accessed: Feb. 26, 2023. [Online]. Available: <https://www.gold.org/goldhub/data/gold-demand-by-country>
- [17] International Council on Mining & Metals, "Working together: How large-scale mining can engage with artisanal and small-scale miners," 2010.
- [18] World Gold Council, "Lecciones aprendidas sobre cómo gestionar la interacción entre la minería a gran escala y la minería artesanal y de pequeña escala de oro," 2022. Accessed: Sep. 25, 2023. [Online]. Available: <https://www.gold.org/esg/artisanal-and-small-scale-gold-mining>
- [19] World Gold Council, "Supply and Demand Statistics." Accessed: Mar. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.gold.org/goldhub/data/gold-demand-by-country>
- [20] Agencia Nacional de Minería, "Oro," Bogotá, May 2022. Accessed: Mar. 19, 2023. [Online]. Available: <http://websiex.dian.gov.co/>.
- [21] Zijin Continental Gold, "Informe de Sostenibilidad 2022 de Zijin-Continental Gold," 2023. Accessed: Sep. 24, 2023. [Online]. Available: https://www.continentalgold.com/informe-de-sostenibilidad-2022-de-zijin-continental-gold/#flipbook-df_19497/1/

-
- [22] UNODC, “Colombia Explotación de oro de aluvión Evidencias a partir de percepción remota 2021,” 2022. Accessed: Sep. 26, 2023. [Online]. Available: https://www.unodc.org/documents/colombia/2022/Junio/Informe_Colombia_Explotacion_de_Oro_de_Aluvion_Evidencias_a_Partir_de_Percepcion_Remota_2021_SP_.pdf
- [23] Valora Analitik, “Aris Gold, el nuevo operador del proyecto Soto Norte en Colombia.” Accessed: Jun. 25, 2023. [Online]. Available: <https://www.valoraanalitik.com/2022/03/22/aris-gold-operador-proyecto-soto-norte-colombia/>
- [24] Unidad de Planeación Minero Energética, “Oro.” Accessed: Mar. 19, 2023. [Online]. Available: <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/oro.aspx>
- [25] ministerio de Comercio, “Contexto macroeconómico,” *Oficina de estudios económicos*, Apr. 2022.
- [26] M. Garside, “Leading countries in gold production in Latin America in 2022.” Accessed: Mar. 19, 2023. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/873931/top-latin-american-countries-gold-production/>
- [27] Banco de la República and Universidad Eafit, “El Mercado del Oro en Colombia y los problemas de abastecimiento de la joyería Nacional,” Medellín, 2014.
- [28] U. Unidad de Planeación Minero Energética, Jhon T. Boyd Company, and EY, “Elaborar los modelos nacionales de oferta y demanda, y balance de minerales, analizando los escenarios mineros y estableciendo proyecciones de oferta y demanda de minerales en el corto, mediano y largo plazo (a 2035),” Bogotá D.C., 2018. [Online]. Available: <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/Publicaciones.aspx>
- [29] EConcept, “Participación del Banco de la República en la comercialización de oro en Colombia,” Bogotá, Jul. 2019.
- [30] Agencia Nacional de Minería, “ABECÉ DEL RUCOM,” Bogotá, 2017. Accessed: Apr. 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.anm.gov.co/sites/default/files/rucom-actualizado-2017.pdf>
- [31] Congreso de Colombia, *Ley 1955 de 2019 Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 Pacto por Colombia, Pacto por la Equidad*. Colombia, 2017, pp. 1–111.
- [32] Agencia Nacional de Minería, *Resolución 623 de 29 dic 2020*. Colombia, 2020, pp. 1–4.

- [33] Unidad de Planeación Minero Energética, “Bases para el análisis de la comercialización del oro en Colombia,” Bogotá D.C., 2021. [Online]. Available: <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/Publicaciones.aspx>
- [34] Departamento Administrativo de la Función Pública, *Decreto 276 de 2015*. Colombia, 2015, pp. 1–9. Accessed: Apr. 17, 2023. [Online]. Available: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=61176
- [35] Unidad de Restitución de Tierras, “Cartilla Minería Preguntas Frecuentes,” Bogotá, Nov. 2015. Accessed: Apr. 17, 2023. [Online]. Available: https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/cartilla_de_mineria_final.pdf
- [36] Agencia Nacional de Minería, “Áreas de Reserva Especial Departamento de Antioquia,” 2019. Accessed: Apr. 17, 2023. [Online]. Available: https://www.anm.gov.co/sites/default/files/info_areas_reserva_esp_antio.pdf
- [37] Agencia Nacional de Minería, “Áreas de Reserva Especial ARE,” 2018. Accessed: Apr. 17, 2023. [Online]. Available: https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/presentacion_ares_para_comunidad_minera_13-08-2018_jorge.pdf
- [38] Agencia Nacional de Minería, “Generalidades del subcontrato de formalización minera y servidumbres,” Bogotá, Apr. 2021. Accessed: Apr. 17, 2023. [Online]. Available: https://www.anm.gov.co/sites/default/files/NormativaConceptosJuridicos/Concepto_20211200278221_web.pdf
- [39] Congreso de Colombia, *Ley 2177 del 30 de diciembre de 2021*. Colombia, 2021, pp. 1–8. Accessed: Apr. 19, 2023. [Online]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=177526>
- [40] London Bullion Market, “LBMA Precious Metal Prices.” Accessed: Jun. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.lbma.org.uk/prices-and-data/precious-metal-prices#/table>
- [41] P. Lamothe and M. Méndez-Suárez, “La valoración con opciones reales. Aplicación a la licencia de explotación de una mina de cobre,” *Revista de Contabilidad y Dirección*, vol. 8, pp. 173–187, Jan. 2009.
- [42] A. Nieto, “Desarrollo de un riesgo socioeconómico estratégico para ayudar a evaluar la factibilidad de proyectos y operaciones mineras,” *Revista Minería*, vol. 519, pp. 20–43, 2020, Accessed: Dec. 18, 2021. [Online]. Available: <http://revistamineria.com.pe/mineria/519/22/>

-
- [43] L. Arias Montoya, S. N. Rave Arias, and J. C. Castaño Benjúmea, "Metodologías para la medición del riesgo financiero en inversiones," *Scientia Et Technica*, vol. 12, no. 32, pp. 275–278, Dec. 2006.
- [44] Project Management Institute., *Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Guía del PMBOK)*., 6th ed. Newton Square: Independent Publishers Group, 2017.
- [45] J. G. Ross, "Risk and uncertainty in portofolio characterisation," *J Pet Sci Eng*, vol. 44, pp. 41–53, 2004, Accessed: Apr. 25, 2023. [Online]. Available: <https://scihub.ru/http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2004.02.004>
- [46] L. Parada Vargas and A. Taborda Restrepo, "Modelos de evaluación económica: su aplicación en las decisiones sanitarias," *Rev Colomb Psiquiatr*, vol. 40, no. 2, pp. 352–362, Jun. 2011, Accessed: Apr. 27, 2023. [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-74502011000200013
- [47] T. Neuberger and N. Ginzo, "Evaluación económica y financiera de proyectos urbanos," in *Semana Internacional de Investigación*, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Sep. 29, 2008, pp. 1–19.
- [48] J. Díaz-Giménez, "Macroeconomía: primeros conceptos," 1999, Accessed: Apr. 27, 2023. [Online]. Available: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/4976>
- [49] Z. Bodie and R. C. Merton, *Finanzas*, vol. 1. España, 2004.
- [50] Universidad Nacional Autónoma de México, "Evaluación económica." Accessed: Apr. 27, 2023. [Online]. Available: <http://www.economia.unam.mx/secss/docs/tesisfe/GomezAM/cap4.pdf>
- [51] Armando. Di Filippo, "Teorías del valor económico y de los precios (Reconsideración crítica y propuestas alternativas)," *Apuntes del Cenes*, vol. 26, no. 42, pp. 25–48, 2006.
- [52] R. Pindyck, "Uncertainty and Exhaustible Resource Markets," *Journal of Political Economy*, vol. 88, no. 6, pp. 1203–1225, 1980, [Online]. Available: <https://EconPapers.repec.org/RePEc:ucp:jpolec:v:88:y:1980:i:6:p:1203-25>
- [53] P. Crowson, "Mine Size and the Structure of Costs," *Resources Policy*, vol. 29, pp. 15–36, Feb. 2003, doi: 10.1016/j.resourpol.2004.04.002.
- [54] C. Watkins and M. McAleer, "Econometric modelling of non-ferrous metal prices," *J Econ Surv*, vol. 18, no. 5, pp. 651–701, 2004, [Online]. Available: <https://EconPapers.repec.org/RePEc:bla:jecsur:v:18:y:2004:i:5:p:651-701>

-
- [55] M.-H. Chen, "Understanding world metals prices--Returns, volatility and diversification," *Resources Policy*, vol. 35, pp. 127–140, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.resourpol.2010.01.001.
- [56] W. C. Labys, A. Achouch, and M. Terraza, "Metal prices and the business cycle," *Resources Policy*, vol. 25, no. 4, pp. 229–238, 1999, [Online]. Available: <https://EconPapers.repec.org/RePEc:eee:jrpoli:v:25:y:1999:i:4:p:229-238>
- [57] K. T. McClain, H. B. Humphreys, and A. Boscan, "Measuring risk in the mining sector with ARCH models with important observations on sample size," *J Empir Finance*, vol. 3, no. 4, pp. 369–391, 1996, [Online]. Available: <https://EconPapers.repec.org/RePEc:eee:empfin:v:3:y:1996:i:4:p:369-391>
- [58] M. C. Roberts, "Duration and characteristics of metal price cycles," *Resources Policy*, vol. 34, no. 3, pp. 87–102, 2009, [Online]. Available: <https://EconPapers.repec.org/RePEc:eee:jrpoli:v:34:y:2009:i:3:p:87-102>
- [59] J. Savolainen, "Real options in metal mining project valuation: Review of literature," *Resources Policy*, vol. 50, pp. 49–65, 2016, doi: 10.1016/j.resourpol.2016.08.007.
- [60] N. Amat and O. Amat, "Del valor financiero al valor real de las empresas," *Revista de economía, empresa y sociedad*, vol. 10, pp. 74–87, 2018, Accessed: Jan. 17, 2022. [Online]. Available: https://oikonomics.uoc.edu/divulgacio/oikonomics/_recursos/documents/10/Oikonomics_10_cast_complet_Opencms_a4.pdf
- [61] R. E. Romero Romero and F. A. García Ruíz, "Caracterización y análisis de modelos de evaluación económica de proyectos de inversión bajo incertidumbre," *Revista ingeniería industrial*, vol. 8, no. 1, pp. 35–50, 2009, Accessed: Apr. 27, 2023. [Online]. Available: <https://revistas.ubiobio.cl/index.php/RI/article/view/81>
- [62] M. A. Cardin, R. de Neufville, and V. Kazakidis, "Process to improve expected value of mining operations," *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology*, vol. 117, no. 2, pp. 65–70, 2008, doi: 10.1179/174328608X362631.
- [63] L. Martinez, "Why Accounting for Uncertainty and Risk can Improve Final Decision-Making in Strategic Open Pit Mine Evaluation," Jan. 2009.
- [64] L. J. Hernández Blanco and A. E. Gualdrón López, "Estudio de Valoración de Empresas Bajo el Modelo de Flujo de Caja Descontado," *Innovando en la U*, Jun. 2014.

- [65] N. C. Valencia Valencia, "Valoración por el método de Flujo de Caja Descontado y EVA de una empresa del sector de la salud, Rehabilitar Ltda., de la ciudad de Popayán (Cauca)," Universidad EAFIT, 2018. Accessed: Sep. 28, 2023. [Online]. Available: <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/13006>
- [66] J. C. Van Horne and J. M. Wachowicz Jr., *Fundamentos de administración financiera*, Pearson Educación., vol. 11. 2002.
- [67] Ó. L. García S, *Administración financiera. fundamentos y aplicaciones*, vol. 4. 2009.
- [68] G. Vedovoto and D. Prior, "Opciones reales: una propuesta para valorar proyectos de I+D en centros públicos de investigación agraria," *Contaduría y Administración*, vol. 57, Mar. 2015, doi: 10.1016/S0186-1042(15)72150-9.
- [69] M. A. López-Roudergue, J. C. Jara-Ramírez, and C. A. Venegas-Villanueva, "Evaluación económica de sesenta microproyectos de riego en la provincia de Ñuble, Chile," *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. II, no. 4, pp. 25–35, 2011, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353531975002>
- [70] F.-S. Giovanni, C. Carlos, and P. Cindy, "NPV risk simulation of an open pit gold mine project under the O'Hara cost model by using GAs," *Int J Min Sci Technol*, vol. 27, pp. 557–565, 2017, doi: 10.1016/j.ijmst.2017.03.004.
- [71] J. Jara Ramirez, C. Vanegas Villanueva, and M. Lopez Roudergue, "Evaluación económica de sesenta microproyectos de riego en la provincia de Ñuble, Chile," *Tecnología y ciencias del agua*, vol. 2, no. 4, pp. 25–35, 2011.
- [72] P. J. Rascón Ortega, *Manual Práctico de Opciones Financieras. Una forma equilibrada de invertir en bolsa*, Libros en Red., vol. 1. 2007.
- [73] S. C. Myers, "Determinants of corporate borrowing," *J financ econ*, vol. 5, no. 2, pp. 147–175, Nov. 1977, doi: 10.1016/0304-405X(77)90015-0.
- [74] S. C. Myers, "Determinants of corporate borrowing," *J financ econ*, vol. 5, no. 2, pp. 147–175, 1977, doi: [https://doi.org/10.1016/0304-405X\(77\)90015-0](https://doi.org/10.1016/0304-405X(77)90015-0).
- [75] S. Bhattacharya, R. Rajan, F. Allen, and A. Schoar, "The Contributions of Stewart Myers to the Theory and Practice of Corporate Finance," *Journal of Applied Corporate Finance*, vol. 20, pp. 8–19, Sep. 2008, doi: 10.1111/j.1745-6622.2008.00200.x.
- [76] L. Trigeorgis, "Real Options and Interactions with Financial Flexibility," *Financ Manage*, vol. 22, no. 3, pp. 202–224, 1993, doi: 10.2307/3665939.
- [77] A. N. A. M. CALLE FERNÁNDEZ and V. M. TAMAYO BUSTAMANTE, "DECISIONES DE INVERSIÓN A TRAVÉS DE OPCIONES REALES," *Estudios Gerenciales*, vol. 25. scieloco, pp. 107–126, 2009.

-
- [78] C. A. Gómez Villa, "Un caso de estudio para evaluar alternativas de inversión," Universidad de Puerto Rico, 2004.
- [79] M. Collan, "Valuation of industrial giga-investments: Theory and practice," *Fuzzy Economic Review*, vol. XVI, pp. 21–37, May 2011, doi: 10.25102/fer.2011.01.02.
- [80] L. Martinez and S. Ramazan, "A maximum upside / minimum downside approach to the traditional optimization of open pit mine design," *Journal of Mining Science*, vol. 43, pp. 73–82, May 2007, doi: 10.1007/s10913-007-0009-3.
- [81] P. Fernandez, "Valoración de opciones reales: Dificultades, problemas y errores," *IESE Business School, IESE Research Papers*, Jan. 2008.
- [82] T. Wang and R. de Neufville, "Identification of Real Options 'in' Projects," Jan. 2005.
- [83] J. J. García Machado, *Opciones reales. Aplicaciones de la teoría de opciones a las finanzas empresariales*, Ediciones Pirámide., vol. 1. España, 2001.
- [84] J. Mascareñas, *Opciones reales y valoración de activos: como medir la flexibilidad operativa en la empresa*. Prentice Hall, 2004.
- [85] F. Black and M. Scholes, "The Pricing of Options and Corporate Liabilities," *Journal of Political Economy*, vol. 81, no. 3, pp. 637–654, 1973, [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/1831029>
- [86] J. C. Cox, S. A. Ross, and M. Rubinstein, "Option pricing: A simplified approach," *J financ econ*, vol. 7, no. 3, pp. 229–263, Sep. 1979, doi: 10.1016/0304-405X(79)90015-1.
- [87] P. P. Boyle, "Options: A Monte Carlo approach," *J financ econ*, vol. 4, no. 3, pp. 323–338, May 1977, doi: 10.1016/0304-405X(77)90005-8.
- [88] J. J. Mascareñas, "Opciones Reales: Gestión y Problemas de su Utilización (Real Options: Management and Problems Using Them)." Universidad Complutense de Madrid, pp. 1–16, 2012. Accessed: Apr. 04, 2023. [Online]. Available: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2316748
- [89] Amram Martha and Kulatilaka Nalin, *Real Options:: Managing Strategic Investment in an Uncertain World*. Oxford University Press, 1998. [Online]. Available: <https://EconPapers.repec.org/RePEc:oxp:oobooks:9780875848457>

-
- [90] P. Bjerksund and S. Ekern, "Managing Investment Opportunities under Price Uncertainty: From 'Last Chance' to 'Wait and See' Strategies," *Financ Manage*, vol. 19, no. 3, pp. 65–83, 1990, doi: 10.2307/3665826.
- [91] A. M. Calle Fernández and V. M. Tamayo Bustamante, "Decisiones de inversión a través de opciones reales," *Estudios Gerenciales*, vol. 25, no. 111, pp. 107–126, Apr. 2009, doi: 10.1016/S0123-5923(09)70073-7.
- [92] W. Hahn and J. Dyer, "Discrete time modeling of mean-reverting stochastic processes for real option valuation," *Eur J Oper Res*, vol. 184, pp. 534–548, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.ejor.2006.11.015.
- [93] F. Longstaff and E. Schwartz, "Valuing American Options by Simulation: A Simple Least-Squares Approach," *Review of Financial Studies*, vol. 14, pp. 113–147, Feb. 2001, doi: 10.1093/rfs/14.1.113.
- [94] A. Mendiola, C. Aguirre, C. Del Castillo, M. Ccopa, L. Flores, and R. Ortíz, "Valoración de una empresa con opciones reales: el caso de Minera Aurífera Peruana," Lima, 2014.
- [95] R. J. Santos, "Blessing and curse. The gold boom and local development in Colombia," *World Dev*, vol. 106, pp. 337–355, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.worlddev.2018.02.016.
- [96] G. Hilson, T. Zolnikov, D. Ramirez-Ortiz, and C. Kumah, "Formalizing artisanal gold mining under the Minamata convention: Previewing the challenge in Sub-Saharan Africa," *Environ Sci Policy*, vol. 85, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.envsci.2018.03.026.
- [97] M. M. Veiga and B. G. Marshall, "The Colombian artisanal mining sector: Formalization is a heavy burden," *Extractive Industries and Society*, vol. 6, no. 1, pp. 223–228, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.exis.2018.11.001.
- [98] L. M. Múnera Vásquez and J. C. Serna Virgen, "Evaluar la correlación entre el nivel de formalización de la pequeña y mediana minería en Colombia y el pago de regalías. Caso programa Oro Legal USAID," Universidad EAFIT, Medellín, 2019.
- [99] Unidad de Planeación Minero Energética, "SIMCO Cifras Sectoriales - Oro." Accessed: Jun. 19, 2023. [Online]. Available: <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/oro.aspx>
- [100] Fedesarrollo, *Cuadernos Fedesarrollo 47. Estudio sobre los impactos socio-económicos del sector minero en Colombia: encadenamientos sectoriales*, vol. 47. 2013.
- [101] J. A. Tarra Almario, "Coexistencia entre minería de oro convencional y de pequeña escala en Colombia," Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2021. Accessed: Sep. 23, 2023. [Online]. Available:

- <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/80821/73192976.2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [102] Mineros S.A., "Memoria de Sostenibilidad," 2021. [Online]. Available: www.hemco.com.ni
- [103] Mineros S.A., "ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LA SITUACIÓN FINANCIERA Y OPERATIVA POR PARTE DE LA ADMINISTRACIÓN," 2023. Accessed: Sep. 23, 2023. [Online]. Available: <https://mineros.com.co/Inversionistas/Informaci%C3%B3n-Financiera>
- [104] SRK Consulting, "NI 43-101 Technical Report Prefeasibility Study Segovia Project Antioquia, Colombia," 2022. Accessed: Sep. 23, 2023. [Online]. Available: [https://s28.q4cdn.com/389315916/files/doc_downloads/segovia/GCM-Segovia_PFS_Update_NI43-101-dated-20220506-\(Final\).pdf](https://s28.q4cdn.com/389315916/files/doc_downloads/segovia/GCM-Segovia_PFS_Update_NI43-101-dated-20220506-(Final).pdf)
- [105] Aris Mining, "Gerencia de Pequeña Minería SEGOVIA-REMEDIOS RPP-140," 2022. Accessed: Sep. 23, 2023. [Online]. Available: https://acmineria.com.co/sitio/wp-content/uploads/2023/05/PMineria_NOV-2022.pdf
- [106] Aris Mining, "EXPANDING FORMALIZATION PARTNERSHIPS." Accessed: Sep. 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.aris-mining.com/Sustainability/expanding-formalization-partnerships/default.aspx>
- [107] El Colombiano, "Por primera vez se firma un acuerdo de formalización minera en Marmato." Accessed: Sep. 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.elcolombiano.com/negocios/por-primera-vez-se-firma-un-acuerdo-de-formalizacion-minera-en-marmato-MF21170149>
- [108] Gramalote Colombia Limited, "Respuesta de AngloGold Ashanti sobre formalización minera en proyecto Gramalote," 2022. Accessed: Sep. 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.business-humanrights.org/es/%C3%BAltimas-noticias/respuesta-de-anglogold-ashanti-sobre-formalizaci%C3%B3n-minera-en-proyecto-gramalote/>
- [109] J. R. Zea Muñoz, "Impacto socioambiental deL desarrollo minero en el reasentamiento poblacional y percepción de los residentes del municipio de San Roque, departamento de Antioquia, Colombia," Buenos Aires, Oct. 2019.
- [110] O. J. Rada Bermúdez, "Análisis de los factores más influyentes en la formalización de unidades productivas mineras de pequeña escala," Universidad Nacional de Colombia , Medellín, 2018.

- [111] D. A. Velilla, "Desarrollo Económico Sostenible - Oportunidades para la formulación de un Modelo Empresarial Sostenible en la Minería de oro a Pequeña escala en un territorio específico," Universidad Nacional de Colombia, 2019. [Online]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77552>
- [112] M. A. Villegas García, "Modelo de gestión de operaciones para el fortalecimiento del área de formalización minera: El caso de Zijin Continental Gold," Universidad EAFIT, Medellín, 2023.
- [113] K. C. Barros Miranda, "Modelo de garantías financieras para el cierre y abandono de la pequeña minería de oro en Colombia," Universidad Nacional de Colombia, 2018. Accessed: Jan. 09, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/69665>
- [114] V. L. Aliaga Zapana, "La informalidad de los comercializadores de oro de la ciudad de Juliaca y su incidencia en la evasión tributaria de los periodos 2014 y 2015," Universidad Nacional del Altiplano, 2017. [Online]. Available: http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/7104/Molleapaza_Mamani_Joel_Neftali.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [115] E. I. ZUBIETA GARAY, "Explotación y exportación de concentrados de mineral de oro a Estados Unidos de America," Universidad Mayor de San Andrés, 2013.
- [116] K. T. McClain, H. Brett Humphreys, and A. Boscan, "Measuring risk in the mining sector with ARCH models with important observations on sample size," *J Empir Finance*, vol. 3, no. 4, pp. 369–391, Dec. 1996, doi: 10.1016/S0927-5398(96)00006-0.
- [117] M. Samis, G. A. Davis, D. Laughton, and R. Poulin, "Valuing uncertain asset cash flows when there are no options: A real options approach," *Resources Policy*, vol. 30, no. 4, pp. 285–298, Dec. 2005, doi: 10.1016/j.resourpol.2006.03.003.
- [118] S. A. Abdel Sabour and G. Wood, "Modelling financial risk in open pitmine projects: implications for strategic decision-making," *J South Afr Inst Min Metall*, vol. 109, no. 3, pp. 169–175, 2009, Accessed: Feb. 11, 2023. [Online]. Available: http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532009000300004&lng=en&nrm=iso&tlng=en
- [119] M. A. Haque, E. Topal, and E. Lilford, "A numerical study for a mining project using real options valuation under commodity price uncertainty," *Resources Policy*, vol. 39, no. 1, pp. 115–123, 2014, doi: 10.1016/j.resourpol.2013.12.004.
- [120] M. A. Haque, E. Topal, and E. Lilford, "Evaluation of a mining project under the joint effect of commodity price and exchange rate uncertainties using real options valuation," *Engineering Economist*, vol. 62, no. 3, pp. 231–253, 2017, doi: 10.1080/0013791X.2016.1217366.

- [121] B. Aminrostamkolaei, J. S. Scroggs, M. S. Borghei, A. Safdari-Vaighani, T. Mohammadi, and M. Hossein Pourkazemi, "Valuation of a hypothetical mining project under commodity price and exchange rate uncertainties by using numerical methods," *Resources Policy*, vol. 52, no. November 2016, pp. 296–307, 2017, doi: 10.1016/j.resourpol.2017.04.004.
- [122] Clavijo; Yesid Esteban, "Problemas de valoración en proyectos de explotación de minas bajo incertidumbre," Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2016.
- [123] M. A. Arango, L. F. Montes, and D. Arboleda, "Aplicación de una opción real de abandono con simulación Monte Carlo y Volatilidad condicional GARCH: Un caso de estudio para un proyecto de inversión minera," *Revista Espacio*, vol. 38, no. 52, pp. 22–40, 2017.
- [124] R. G. Dimitrakopoulos and S. A. Abdel Sabour, "Evaluating mine plans under uncertainty: Can the real options make a difference?," *Resources Policy*, vol. 32, no. 3, pp. 116–125, Sep. 2007, doi: 10.1016/J.RESOURPOL.2007.06.003.
- [125] S. A. Abdel Sabour, R. G. Dimitrakopoulos, and M. Kumral, "Mine design selection under uncertainty," *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology*, vol. 117, no. 2, pp. 53–64, 2008, doi: 10.1179/174328608X343065.
- [126] S. A. Abdel Sabour and R. Poulin, "Valuing real capital investments using the least-squares Monte Carlo method," *Engineering Economist*, vol. 51, no. 2, pp. 141–160, Jul. 2006, doi: 10.1080/00137910600705210.
- [127] M. Gómez González, "Sistema de generación eléctrica con pila de combustible de óxido sólido alimentado con residuos forestales y su optimización mediante algoritmos basados en nubes de partículas," Universidad Nacional de educación a distancia, 2008.
- [128] M. C. Vélez and J. A. Montoya, "Metaheurísticos: Una alternativa para la solución de problemas combinatorios en administración de operaciones," *Revista EIA*, vol. 8, pp. 99–115, Dec. 2007.
- [129] C. E. Maldonado, "Metaheurísticas y resolución de problemas complejos," *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*, vol. 16, no. 33, pp. 169–185, Dec. 2016.
- [130] C. A. Ramírez Vanegas, "Comparación entre las metaheurísticas y los algoritmos de estimación de distribución en procesos estocásticos," Universidad Tecnológica de Pereira, 2018.

- [131] G. Franco-Sepúlveda, J. C. Del Rio-Cuervo, and M. A. Pachón-Hernández, “State of the art about metaheuristics and artificial neural networks applied to open pit mining,” *Resources Policy*, vol. 60, pp. 125–133, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.RESOURPOL.2018.12.013.