



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Decisiones de inversión por medio de opciones reales para el sector de hidrocarburos.

Diana Lorena Muñoz Gómez

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Económicas

Bogotá, Colombia

2017

Decisiones de inversión por medio de opciones reales para el sector de hidrocarburos.

Diana Lorena Muñoz Gómez

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ciencias Económicas

Director (a):

Germán Guerrero

Profesor Facultad de Ciencias Económicas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Económicas

Bogotá, Colombia

2017

Agradecimientos

Quiero agradecerle a mi director de tesis, German Guerrero, por su orientación, acompañamiento y consejos en la estructuración de este documento, lo cual ha sido una experiencia muy constructiva para mí. Gracias a la empresa que me brindó la información y el apoyo técnico para comprender mejor el caso de negocio seleccionado, a los departamentos de proyectos y de ingeniería de yacimientos y en especial a los ingenieros Juan Pablo Uribe y Enrique Gallardo que dispusieron de su tiempo para explicarme las consideraciones técnicas de los proyectos de la industria de hidrocarburos y su validación técnica a los perfiles de producción.

Gracias a mi amigo Luis Daniel Pico, quien revisó las diferentes versiones del documento y me dio su valiosa retroalimentación. Gracias a mi amiga Jazmín James por su compañía en el proceso de aprendizaje de la maestría. Y por supuesto gracias a mis papás por darme su apoyo y acompañarme en los días de estudio, los amo infinitamente.

Resumen

La economía colombiana se vio afectada por la crisis de la caída de los precios del petróleo en 2014, su crecimiento en el PIB pasó del 4,9% en 2013 a un crecimiento de 2% en 2016, Esta dependencia de la economía colombiana al desempeño de la industria de hidrocarburos incentiva esta investigación. Este trabajo explora como la metodología de opciones reales permite por un lado estimar la volatilidad asociada a variables de incertidumbre como los precios del petróleo, las reservas de los yacimientos, el capex y Opex de los proyectos de inversión y por otro lado permite valorar la flexibilidad que tiene la gerencia para cambiar las decisiones durante la vida de los proyectos.

El modelo aplica las opciones de elegir, esperar, expandir, abandonar y opción compuesta, con la metodología de árboles binomiales y simulando los precios del petróleo con el proceso estocástico de reversión a la media, para un campo de producción que tiene un contrato de operación con un socio. Los resultados sugieren realizar la compra de la participación del socio, ejercer la opción de expansión hasta la inyección de agua y esperar para ejecutar la expansión de inyección de químico. Este modelo arroja un mayor valor que el hallado con VPN y cumple con el requisito de rentabilidad de la empresa, lo cual implica que la decisión de inversión de la misma cambia según la metodología usada.

Palabras clave: opciones reales, opción compuesta, opción de elegir, inversiones bajo incertidumbre, volatilidad, precios del petróleo, reversión a la media.

Abstract

The colombian economy was affected by the crisis of oil prices in 2014. Its GDP growth went from 4.9% in 2013 to 2% in 2016. The dependence of the colombian economy on the performance of the hydrocarbon industry encourages this research. On the one hand, this paper explores how the real options methodology allows to estimate the volatility associated with uncertainty variables such as oil prices, reservoir reserves, as well as the capex and opex of the investment projects. On the other hand, it allows to value the flexibility the management has to change the decisions during the project's life.

The model implements options of choose, wait, expand, abandon and compound options for a production field that has an operating contract with a partner, using the binomial tree methodology and simulating oil prices with stochastic process of mean reversion. The results suggest buying the partner's share, execute the expansion option until the water injection phase and wait to execute the chemical injection expansion. This model shows a higher value than found with NPV methodology and fulfill the company's profitability requirement. This implies that the Company's investment decision changes according to the methodology used for the analysis.

Keywords: Real Options, Compound Options, Choose Option, investments under uncertainty, volatility, oil prices, mean reversion.

Contenido

1. Introducción	8
2. Marco teórico	10
2.1. Metodologías de toma de decisiones de inversión tradicionales.	12
2.2. Metodología de toma de decisiones con opciones reales.....	15
2.2.1. Modelo binomial	16
2.2.2. Modelos de opciones reales.....	20
▪ Opción de abandono	20
▪ Opción de expansión.....	21
▪ Opción de esperar.....	21
▪ Opción de elegir	22
▪ Opciones compuestas.....	22
2.3. Opciones reales en la industria de hidrocarburos.....	22
2.3.1. Principales fuentes de incertidumbre.....	24
▪ Proyección de precios del petróleo.....	25
3. Diseño metodológico aplicado a la industria de hidrocarburos	26
4. Desarrollo del modelo	28
4.1. Análisis cualitativo de escenarios estratégicos	28
▪ Exploración	29
▪ Producción	30
▪ Abandono.....	30
4.1.2. Plan de desarrollo	30
4.1.3. Esquema contractual de operación	32
4.2. Valoración del caso base por medio de VPN	33
4.2.1. Estimación de ingresos	33

4.2.2. Estimación del capital de inversión y costos de operación.....	34
4.2.3. WACC y valoración con VPN.....	36
4.3. Simulación de Monte Carlo	38
4.3.1. Simulación de reservas	38
4.3.2. Simulación de los precios del petróleo	39
4.3.3. Simulación de <i>capex</i>.....	40
4.3.4. Simulación de <i>opex</i>.....	40
4.4. Análisis estratégico de opciones reales.....	41
4.5. Valoración de opciones reales	42
4.5.1. Mantener las condiciones contractuales y no desarrollar más el campo 43	
4.5.2. Comprar la participación al socio y desarrollar el campo.....	45
4.5.3. Esperar al vencimiento del contrato y desarrollar el campo después	51
4.5.4. Opción de elección	53
4.6. Análisis de resultados y recomendaciones	54
5. Conclusiones.....	55
Bibliografía	57
Lista de figuras.....	60
Lista de tablas.....	61
ANEXOS.....	62
Modelos de valoración intrínseca	62
Modelos de valoración relativa	65
Ecuaciones de diferencias parciales – Black-scholes.....	67
Metodologías de estimación de volatilidad	70
Otras opciones reales	73
Análisis de los precios del petróleo	75

1. Introducción

La economía colombiana se vio afectada por la crisis de la caída de los precios de las materias primas en 2014. Su crecimiento en el PIB pasó del 4,9% en 2013 a un crecimiento de 2% en 2016. Se presentó una alta devaluación, pues la TRM de 2013 era de \$1.900 y pasó a ser de \$3.000 en 2016. Adicionalmente, la inflación que en 2013 fue de 1,94%, fue 5,75% en 2016, impactando considerablemente el poder adquisitivo de los colombianos. (Banco de la Republica , 2016). El menor desempeño de la economía colombiana se puede explicar principalmente por la caída en los precios del petróleo, un 60% entre 2014 y 2016, ya que en el periodo de 2001 a 2014 representaban el 50% de las exportaciones del país, el 30% de la inversión extranjera directa y el 23% de los ingresos del gobierno nacional (Fedesarrollo, 2016). Esta dependencia de la economía colombiana al desempeño de la industria de hidrocarburos incentiva esta investigación, cuyo objetivo es *identificar la metodología de evaluación económica y financiera que soporte la toma decisiones de inversión óptimas bajo condiciones de incertidumbre para la industria de hidrocarburos.*

El estudio de la toma de decisiones de inversión es fundamental en las ciencias económicas, ya que la inversión genera diferentes impactos en la economía. Al analizarlo desde una perspectiva macroeconómica, se encuentra que en el corto plazo impacta la demanda agregada de recursos y por lo tanto el crecimiento económico; y en el largo plazo, ésta puede incentivar el desarrollo de nuevos mercados, la creación de empleo y el aumento de capital físico y humano (Lombardi, 2009).

La teoría de decisiones estudia el proceso de elección entre alternativas que están inmersas en riesgo e incertidumbre. Las decisiones que se encuentran bajo riesgo se caracterizan por tener consecuencias que no son predecibles, pero que siguen una distribución de probabilidad que es conocida. En cambio, las decisiones bajo incertidumbre se caracterizan porque la distribución de probabilidad es parcialmente desconocida (Hens & Rieger, 2010). Dado que las empresas que pertenecen a la industria de hidrocarburos toman decisiones de inversión sobre portafolios de proyectos que están sujetos a diferentes fuentes de incertidumbre¹, se debe encontrar una metodología de análisis para la toma de decisiones

¹ Entre las fuentes de incertidumbre se encuentra el comportamiento de los precios del petróleo y el volumen de reservas de petróleo existentes en el yacimiento, por otro lado las fuentes de riesgo como el costo asociados a las inversiones de capital (Capex: Capital Expenditures) y el costo asociado a la operación de los proyectos (Opex: Operating Expenditures),

de inversión que permita capturar el impacto que tiene dicha incertidumbre en el valor esperado de los proyectos.

Para cumplir con su objetivo, este documento explora cómo la implementación de la metodología de opciones reales puede brindar un mejor soporte a los gerentes en el proceso de toma de decisiones de inversión en el sector de hidrocarburos frente a las metodologías tradicionales de evaluación como el Valor Presente Neto (VPN). Dentro de los hallazgos de esta investigación se tiene que dicha metodología es más precisa para el análisis de las inversiones, ya que permite, por medio de la estimación de la *volatilidad* (σ), simular la incertidumbre y el riesgo de los proyectos de inversión de forma dinámica, además de valorar las diferentes decisiones que puede tomar el gerente en relación al proyecto, es decir, la flexibilidad que éste tiene para cambiar sus decisiones ante choques externos, positivos o negativos, y cambios en los proyectos debidos a cambios en la estrategia de la compañía. Al usar esta metodología, se logra reflejar un valor más apropiado de la inversión, generalmente evitando una subvaloración y el posterior rechazo de la inversión, lo que a su vez representaría evitar una asignación no óptima de recursos en la economía.

Específicamente en el marco teórico se analiza la metodología tradicional de toma de decisiones de inversión que es el Valor Presente Neto VPN, herramienta que es descuenta con la tasa de descuento apropiada los flujos de caja libre de un proyecto, posteriormente se realiza un análisis crítico sobre los principales problemas de estimación de esta, para finalmente entender la metodología más contemporánea de las opciones reales. Allí se presentan las herramientas con las que se estiman las opciones reales, como la estimación por medio de árboles binomiales, la metodología para calcular la volatilidad y el proceso estocástico con reversión a la media que se usará para modelar los precios del petróleo. Además, se definen las diferentes opciones reales de expansión, abandono, contracción, esperar, elegir y opciones compuestas y una revisión general de la implementación de las opciones reales para decisiones de inversión en la industria de hidrocarburos, identificando las principales fuentes de incertidumbre de la industria. En el diseño metodológico se plantea el proceso que deben realizar las organizaciones para valorar los diferentes proyectos con la metodología de opciones reales.

El desarrollo del modelo implementa la metodología de opciones reales con el fin de definir la estrategia de inversión adecuada para uno de los campos petroleros que opera la

empresa². Para esto, primero se identifican tres alternativas estratégicas de inversión: 1) Mantener las condiciones contractuales y no desarrollar más el campo, 2) comprar la participación al socio y desarrollar el campo 3) esperar al vencimiento del contrato y desarrollar el campo. El siguiente paso fue implementar la opción compuesta para el plan de desarrollo bajo cada alternativa y finalmente se implementa una opción de elegir para dar la recomendación sobre la decisión de inversión. La recomendación final arroja que la empresa debe comprar de la participación del socio y realizar la inversión en el desarrollo del campo hasta la fase de expansión de la inyección de agua.

En conclusión se encuentra que la industria de hidrocarburos está sujeta a diferentes fuentes de incertidumbre, como la estimación de los precios del petróleo, las reservas, el Capex y el Opex. Por eso, en muchos casos la valoración por medio de VPN puede arrojar resultados negativos o marginales según los criterios de la empresa, que lleva a que no se efectúen las inversiones. Al aplicar la metodología de opciones reales los agentes que toman decisiones de inversión tienen una herramienta análisis que es complementaria al VPN y es más robusta ya que 1) incorpora la incertidumbre a la valoración por medio de la volatilidad estimada, 2) asigna un valor cuantitativo a las estrategias cualitativas al estimar las diferentes opciones de expandir, esperar, abandonar, entre otras y 3) incluye en el valor a la flexibilidad que tiene el tomador de la decisión de cambiar el proyecto durante el desarrollo del mismo.

2. Marco teórico

Para estudiar el proceso de toma de decisiones de inversión se debe tener claridad sobre su definición. Para Dixit & Pindyck la inversión es el acto de incurrir en un gasto inmediato para obtener un beneficio futuro y tiene tres características básicas: 1) esta puede ser parcial o totalmente irreversible³ debido a los costos hundidos; 2) está afectada por un alto nivel de incertidumbre sobre los retornos y costos futuros (insumos, mano de obra, costo de renta del capital, etc.); 3) que los agentes eligen en qué momento realizar la inversión

² La identidad de la empresa no se divulgará para mantener la confidencialidad de la información.

³ Es irreversible pues, una vez iniciada una inversión, no se puede "deshacer totalmente" o convertirse en un tipo diferente de proyecto, sin incurrir en altos costos de desinversión, lo que afecta la forma en que se evalúa el costo de capital de una inversión. (Bernanke, 1983)

en función de la información disponible. A partir de este concepto de inversión, Dixit y Pindyck recomiendan el uso de opciones reales, pues el hecho de que la decisión de inversión se vea afectada por la incertidumbre, la irreversibilidad y que se pueda aplazar, invalida los modelos de inversión neoclásicos basados en el VPN. Es así, ya que al realizar un análisis determinístico⁴ de las variables, éste no considera los posibles cambios en los retornos y el costo de inversión que son generados por la incertidumbre; por lo tanto, puede ser que no se esté tomando la mejor decisión de inversión (Dixit & Pindyck, 1994).

Ahora bien, las empresas han usado diferentes herramientas de valoración para tomar decisiones de inversión de capital⁵ que implican encontrar el valor del activo y comparar su desempeño en relación con otras posibles inversiones. Según Damodaran (2005), existen cuatro enfoques de valoración que se usan como herramientas de decisión de inversión (las primeras tres se consideran como metodologías tradicionales): la primera la denomina como *valoración intrínseca*, que se basa en el valor presente de los flujos de caja futuros esperados de la empresa y en los fundamentales del negocio (VPN); el segundo es la *valoración relativa*, donde se analizan las empresas comparables y sus múltiplos; el tercero lo define como *valoración contable*, que se basa en el valor de patrimonio; y finalmente, el enfoque de *valoración por modelos de opciones reales* que construyen flujos de caja contingentes ante diferentes escenarios de incertidumbre (Damodaran, Valuation Approaches and Metrics: A Survey of the Theory and Evidence, 2005)

En la siguiente sección, se presentarán las metodologías para la toma de decisiones tradicionales basadas en el VPN y se presentan sus principales limitaciones. En la segunda parte se presenta la metodología de opciones reales, su origen, los cálculos necesarios para su estimación y los tipos de opciones que se pueden estructurar. Finalmente, se realiza un análisis de las principales fuentes de incertidumbre asociadas a la industria de hidrocarburos y cómo se han usado las opciones reales para incluir dicha incertidumbre en el análisis de inversión.

⁴ Un modelo determinista es un modelo matemático donde las mismas entradas o condiciones iniciales producirán invariablemente las mismas salidas o resultados, no contemplándose la existencia de azar o incertidumbre en el proceso modelado mediante dicho modelo.

⁵ Se van a considerar como equivalentes la inversión en activos, proyectos, empresas y estrategias.

2.1. Metodologías de toma de decisiones de inversión tradicionales.

Algunas de las teorías desarrolladas en relación a la toma de decisiones de inversión han sido: la teoría de inversión de Irving Fisher (1907), que fue uno de primeros en proponer los principios de la inversión y de la valoración a través del VPN; el estudio de Keynes sobre la tasa interna de retorno⁶; la teoría de optimización de Jorgenson; la teoría de ajuste marginal de costo; la q de Tobin, entre otros. (Damodaran, 2005).

El modelo fundamental de valoración intrínseca es el Valor Presente Neto (VPN), donde el valor de un activo se basa en la proyección de pagos futuros⁷ traídos a valor presente, que es descontado a una tasa de descuento adecuada que refleja el riesgo de dicho activo. Este método es el que tiene mayor relevancia en la academia y en la práctica, ya que es el más usado por las empresas. Irving Fisher supone que al enfrentar múltiples opciones de inversión, el agente debe elegir la opción que: a) tenga el mayor valor presente a la tasa de interés del mercado, b) que el valor presente de los beneficios sea mayor al valor presente de los costos y c) que la tasa interna de retorno supere la tasa de interés del mercado. El énfasis de esta definición estaba entonces en la correcta valoración de los flujos y la selección de la tasa de descuento; dicha tasa incorpora el nivel de riesgo asociado a la inversión⁸. A continuación se presenta la fórmula básica del VPN:

$$\text{Valor presente} = \sum_{t=1}^T \frac{\text{flujos de caja futuros esperados}}{(1 + \text{tasa requerida de retorno})^t}$$

Alguna de las ventajas que presentan los modelos tradicionales como el de flujos de caja descontados es que son métodos relativamente fáciles de entender y aplicar, ya que el

⁶ Los economistas Boulding (1935) y Keynes (1936) definieron otro instrumento para la toma de decisiones de inversión que es la Tasa interna de retorno (TIR), que se entiende como la eficiencia marginal del capital, que es calculada al hallar la tasa de descuento que hace el valor presente de los retornos de un activo igual a cero. La TIR se puede usar para tomar decisiones de inversión, bajo la regla que si la TIR es mayor a la tasa de descuento, entonces se recomienda realizar la inversión. (Damodaran, 2005).

⁷ Estas proyecciones se realizan por medio del análisis fundamental, que estudia la información básica de una empresa, conocimiento del negocio, analiza sus estados financieros y realiza la proyección en función a este análisis (Penman, 2009).

⁸ En los anexos se presentan las diferentes variaciones del VPN, que pueden ser usados para decisiones de inversión en empresas, proyectos, acciones, entre otros

marco teórico de soporte solo requiere un análisis matemático básico; pero, en general, los modelos de valoración tradicionales tienen limitaciones para tomar decisiones en condiciones de incertidumbre. A continuación, se presentan las principales críticas encontradas en la revisión bibliográfica y como cada autor resalta las posibles soluciones a estos problemas por medio de la aplicación de opciones reales:

- Los modelos tradicionales suponen que las variables de entrada de los proyectos son constantes en el tiempo, asumen una estrategia de todo o nada y, aunque se incluya un análisis de probabilidad, estos no consideran el valor asociado en función a que la gerencia pueda ser flexible en las decisiones según la incertidumbre se va resolviendo, es decir, no captura el valor de las opciones de esperar, expandir o abandonar (Damodaran, 2006).
- Según Myers (1984) la metodología de flujo de caja descontado es de ayuda al valorar negocios estables y con poco riesgo, pero no en el caso que se presenten opciones de crecimiento o cuando sea necesario valorar activos intangibles y plantea que esta metodología centra su atención solo al flujo de caja que pueda llegar a generar y no en el valor estratégico que pueda tener esta inversión, como es el caso de las inversiones en investigación y desarrollo; además establece que la metodología de opciones reales es de gran utilidad para el análisis estratégico de las empresas.
- Otra de las deficiencias de los modelos tradicionales es que, al no asumir la flexibilidad del proyecto y de la gerencia, es factible que no anticipe la entrada de nuevos competidores y/o cambios tecnológicos que modifiquen el entorno competitivo en el que la empresa opera. Para identificar y definir estrategias competitivas se puede hacer uso de una combinación de opciones reales y los principios de teoría de juegos en organizaciones industriales (Trigeorgis & Smith, 2004)
- Cuando el valor de un proyecto es negativo o marginal (al ser valorado con el VPN) y el proyecto incluye la posibilidad de que la gerencia tenga la flexibilidad de modificar las condiciones de la inversión, el análisis de opciones reales provee información y valora dicha flexibilidad, de tal forma que facilita la decisión de invertir, lo que puede contribuir a minimizar las pérdidas y soportar mejor una decisión de crecimiento (Kodukula & Papudesu, 2006).

- Según Mun (2002), una vez tomada la decisión, se asume que los proyectos son administrados de forma pasiva. Además, todos los riesgos son asumidos por completo en la tasa de descuento y no se considera el valor de los activos intangibles. En cambio, con la metodología de opciones reales, se pueden considerar diferentes escenarios de toma de decisión, donde los gerentes tienen la flexibilidad de elegir la estrategia óptima según se va adquiriendo nueva información. Finalmente, al realizar una comparación entre las dos metodologías, se puede encontrar que en el análisis de VPN no todos los riesgos y costos asociados a una pérdida se incluyen; en cambio, en el análisis de opciones reales, este riesgo es mitigado por medio de la opción de abandono o no ejecución del proyecto. Además, el perfil de pagos de ganancia es maximizado, ya que el proyecto solo se ejecuta en el caso que ocurra el mejor escenario. (Mun, 2002)

Por otra parte en las diferentes revisiones bibliográficas se ha identificado que la metodología de opciones reales tiene un gran atractivo teórico para valorar proyectos de crecimiento, pero ésta ha presentado dificultades para lograr la implementación en las empresas. Algunas explicaciones indican que las opciones reales pueden llevar a sobreestimar (comparado con el VPN) el valor de proyectos con incertidumbre e inducir a las empresas a invertir de más en ellos y que por otro lado que al requerir mayor sofisticación estadística y matemática, puede generar errores de estimación. Entonces surge el problema: ¿cómo realizar la implementación de manera correcta y moderada? Para responder a esta pregunta, se debe tener claro que la metodología de las opciones reales y el VPN son complementarios y no excluyentes. De hecho, el valor total del proyecto es la suma de los dos valores, por lo cual los gerentes pueden integrar los dos enfoques para valorar oportunidades de inversión en las que deba reflejar la complejidad e incertidumbre asociada a los proyectos de inversión. Por otro lado, la sobreestimación de dichas oportunidades, principalmente se debe a que los gerentes suelen aplicar el análisis de volatilidad solo a los ingresos y no consideran los riesgos asociados a los costos de inversión, lo que puede llevarlos a dicha sobreestimación (Putten & MacMillan, 2004). Finalmente, es necesario que las escuelas de negocios y las empresas consideren mejorar sus herramientas de análisis e incluyan en su agenda las opciones reales como herramienta para la toma de decisiones.

2.2. Metodología de toma de decisiones con opciones reales

La metodología de opciones reales se ha desarrollado a partir de la teoría de opciones financieras, concebidas por Fisher Black, Robert Merton, y Myron Scholes. Esta teoría es considerada un avance revolucionario dentro de las herramientas utilizadas para la modelación de los riesgos financieros y económicos, motivo por el cual fueron galardonados con un premio nobel en economía (Parsons & Mello, 2009). Stewart Myers, en 1977, fue el primero en usar el término de opciones reales en la aplicación de la teoría de opciones en la valoración de bienes no financieros, específicamente en activos reales, que se caracterizan por presentar un componente de flexibilidad, como lo pueden ser las inversiones en investigación y desarrollo, y la expansión de empresas (Myers, 1977). La valoración de opciones reales, según Mun (2002) en su libro de *Real Options*, es una metodología sistemática e integrada que usa la teoría financiera, análisis económicos, teorías de decisiones, estadística y modelos econométricos, que aplica la teoría de opciones en activos reales y no financieros.

Dixit y Pindyck establecen según su definición de inversión, presentada con anterioridad en este documento, que al considerar el supuesto de que las inversiones tienen irreversibilidad y la posibilidad de aplazar el desembolso, la decisión de invertir puede cambiar drásticamente frente a asumir que las inversiones tienen perfecta movilidad y libre posibilidad de modificación en el tiempo. Además, los autores definen que si una empresa tiene la oportunidad de hacer una inversión, posee una opción real que es análoga a una opción de compra⁹, en la que se tiene la opción de continuar con la opción de inversión, pero no está obligado a terminar de ejecutarla. Esta es una característica especial de los proyectos de inversión en la industria de hidrocarburos, ya sea en la etapa de exploración o al iniciar un contrato de operación de campos de producción.

Ahora bien, para aplicar el análisis de opciones reales a proyectos se requieren diversos análisis. En primer lugar, se requiere indagar sobre los factores que dirigen el valor de los proyectos, la operación, el cambio tecnológico, cambios en las condiciones del mercado,

⁹ La opción de compra le confiere a su titular, dentro de un período de tiempo específico, el derecho pero no la obligación de comprar el activo cambio de pagar un precio de ejercicio (Dixit & Pindyck, A new view of investment, 1994)

entre otros que están sujetos a incertidumbre, ya que el valor de las opciones depende del riesgo que puedan llegar a generar estos factores que, en general, presenta una relación directamente proporcional en la que al aumentar, se incrementa el valor de la opción. En segundo lugar, se asume que existe la flexibilidad gerencial que se manifiesta con la existencia de opciones estratégicas que los gerentes pueden ejecutar en el tiempo conforme la incertidumbre se va resolviendo. Tercero, los gerentes deben ser racionales y ejecutar las opciones cuando el valor generado es por lo menos igual al riesgo asumido.

Teniendo claros estos supuestos y análisis necesarios para usar la metodología, se identifica que esta no sólo provee una forma de medir la flexibilidad gerencial, sino que también indica las condiciones óptimas en las que se debe ejecutar una determinada estrategia (Mun, 2002). Esto permite orientar a los gerentes sobre los posibles planes de acción y estrategias sujetas a cambios en las condiciones de mercado y que los gerentes puedan maximizar las ganancias y minimizar las pérdidas.

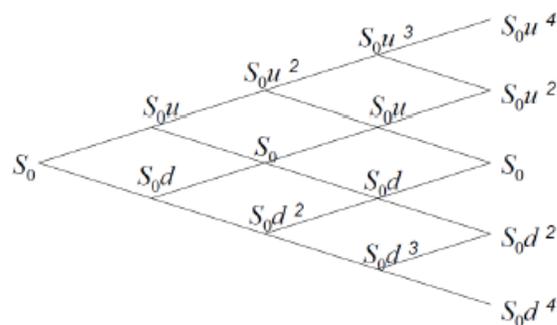
Entonces, teniendo claro el origen, las características y las ventajas de usar opciones reales para la toma de decisiones de inversión, se procede a presentar la teoría y cálculos necesarios para aplicar hallar el valor de las opciones. En un sentido práctico, la valoración por medio de opciones reales inicia con la estimación del flujo de caja libre descontado por el WACC, para después incorporar en el análisis el costo de inversión (*strike price*), el valor adicional asociado a la incertidumbre del activo (volatilidad) y la flexibilidad del tomador de decisión de elegir escenarios contingentes (Kodukula & Papudesu, 2006). Existen principalmente dos métodos para estimar el valor de las opciones. El primero usa ecuaciones de diferencias parciales que fue desarrollado en el modelo de Black – Sholes, (este se encuentra desarrollado en los anexos); y el segundo método es el de Lattices (binomiales, trinomiales y multinomial), que será explicado a continuación ya que es el seleccionado para el desarrollo del presente modelo por su facilidad de calcular y explicar a los tomadores de decisiones y su capacidad de adaptarse a cualquier clase de opción real.

2.2.1. Modelo binomial

El modelo binomial Propuesto por Cox, Ross y Rubinstein en 1974 es un modelo discreto que considera que la evolución del precio del activo subyacente varía según el proceso

binomial multiplicativo. Este modelo puede ser representado por el árbol binomial que se muestra en la figura de abajo, donde S_0 ¹⁰ es el valor inicial de activo y en cada escenario incremental se puede tomar un valor al alza u o a la baja d , de forma consecutiva, donde $u > 1$ y $d < 1$ y se asume que $u=1/d$. La magnitud de estos factores depende de la volatilidad del activo. En el primer paso, el árbol tendrá dos nodos ($S_0 u$, $S_0 d$). En el segundo paso este tendrá tres posibles valores ($S_0 u^2$, $S_0 u d$, $S_0 d^2$), y así sucesivamente para cada nodo. Los últimos nodos del árbol, representan el rango de valor del activo al vencimiento de la opción (Kodukula & Papudesu, 2006).

Ilustración 1 árbol binomial recombinado



El modelo presentado en la gráfica anterior es llamado árbol recombinado, donde el nodo central es el mismo para el predecesor de alza $S_0 u$ y el de baja $S_0 d$. Esta clase de árbol es la más usada para estimar opciones¹¹. Otra alternativa es el árbol que no recombina los valores, y el nodo central es diferente para sus predecesores. El modelo de Lattices se resuelve de dos formas. La primera alternativa es por medio del uso de probabilidades neutras al riesgo y la segunda consiste en crear un portafolio de replicación. Las dos conducen a los mismos resultados, pero su proceso de cálculo matemático es un poco diferente. Para el alcance de este documento solo se revisará el método de probabilidades neutras al riesgo, el método de replicación de portafolio puede ser revisado a mayor profundidad en el documento de Copeland y Antikarov (2001).

¹⁰ El valor de S_0 es equivalente al VPN del proyecto descontado a la tasa adecuada

¹¹ Además de los árboles ya mencionados, se pueden construir árboles trinomiales y cuatrinomiales para resolver problemas de opciones, que son en concepto muy similares a las binomiales, pero presentan una mayor complejidad de cálculo computacional.

La metodología básica de probabilidades neutras al riesgo consiste en ajustar las probabilidades de un flujo de caja a un riesgo que ocurre en un momento específico del tiempo, esto para los correspondientes nodos del árbol. Usar las probabilidades ajustadas al riesgo le permite al analista descontar estos mismos flujos ajustado con la tasa libre de riesgo¹². Sin importar el tipo de opción a valorar, se requiere como mínimo la construcción de dos árboles binomiales: el primer árbol binomial representa el valor del activo, mientras que el otro árbol representa el valor de la opción. Ahora bien, no importa cual tipo de opción real se va a desarrollar, pues siempre se puede adaptar a la estructura de valoración con probabilidades neutras al riesgo, ya que tiene las mismas propiedades y puede ser estimado por las siguientes ecuaciones. El primer nodo del árbol siempre es el valor del activo, mientras el segundo nodo refleja el valor de la valoración de la opción. A continuación se presentan los inputs básicos de este modelo y las fórmulas para calcular el factor al alza u , el factor a la baja d , y la probabilidad neutral al riesgo p .

$S =$ es el valor actual de activo subyacente

$X =$ Strike price: valor presente del costo de implementar la opción

$\sigma =$ volatilidad del logaritmo natural de los retornos del flujo de caja libre

$t =$ tiempo de expiración de la opción

$\delta t =$ el tiempo asociado a cada paso del árbol binomial

$$u = e^{\sigma\sqrt{\delta t}} \text{ Y } d = e^{-\sigma\sqrt{\delta t}} = 1/u$$

$$p = \frac{e^{(r-b)(\delta t)} - d}{u - d}$$

Donde r es la tasa libre de riesgo durante la vida de la opción y b son los dividendos pagados de forma constante en porcentaje.

¹² En el desarrollo del modelo se puede entender con mayor claridad el proceso para implementar los arboles binomiales con probabilidades neutras al riesgo

Es importante aclarar que las probabilidades neutras al riesgo no tienen un significado económico ni financiero, ya que son solo un paso intermedio que permite calcular el valor de una opción (Kodukula & Papudesu, 2006). Para estimar el valor de la opción, se debe construir el árbol binomial con los factores *up* y *down*, y después, los valores finales de este se deben resolver por el proceso inductivo hacia atrás, usando la ecuación de probabilidad neutra, hasta llegar al nodo inicial, el cual arroja el valor de la opción¹³. Si la volatilidad es igual a cero, se estaría asumiendo que se está en un mundo determinístico en el que no existen incertidumbres, y el valor de la opción sería igual a la del VPN, otra relación entre volatilidad y el valor de la opción es que entre mayor sea su valor es decir el riesgo, mayor es el valor de la opción.

La volatilidad σ , como se ha evidenciado, es una de las variables de entrada más importantes para los modelos de valoración de opciones y es probablemente la más difícil de estimar. Esta es una medida de la variabilidad del valor de activo durante su tiempo de vida; en este caso, de las tasas de retorno del flujo de caja del activo. El enfoque de retornos logarítmicos sobre el flujo de caja, será la herramienta para estimar la volatilidad. Este usa el flujo de caja futuro estimado y sus correspondientes retornos logarítmicos. Se inicia tomando la serie proyectada de flujos de caja futuros y los convierte en retornos relativos para después hallar el logaritmo natural de estos flujos y finalmente estimar la volatilidad, con la siguiente formula:

$$volatilidad = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Donde n es el número de la muestra x , y \bar{x} es el promedio de los valores de x . Dado que es difícil tener certeza del futuro y que existe incertidumbre asociada a las variables que afectan el comportamiento del flujo de caja, como los ingresos, los costos, la tasa de descuento, la inversión, etc., se recomienda usar un proceso estocástico de movimiento browniano sobre las variables más sensibles, para lo cual se deben asignar distribuciones de probabilidad ajustadas a los datos históricos de dichas series y después se puede usar

¹³ El procedimiento más detallado sobre el cálculo de las opciones reales se puede encontrar en el Libro de Johnathan Mun en los capítulos 6 y 7 de su libro Real Options Analysis

un software de simulación como Cristal Ball para hacer la simulación de Monte Carlo¹⁴, y así estimar el riesgo de los flujos de caja y posteriormente la volatilidad del proyecto de inversión.

2.2.2. Modelos de opciones reales

Esta sección presenta los diferentes modelos de opciones reales, dentro de las cuales se encuentran las opciones simples de abandono, expansión, espera y contracción de un activo, y las opciones más complejas como las de elegir y compuestas. Estas opciones son necesarias para entender las diferentes alternativas y estrategias que puede tener un proyecto de inversión, en especial para el caso seleccionado para la industria petrolera y el desarrollo del modelo de este documento¹⁵.

▪ Opción de abandono

Prácticamente todos los proyectos tienen una opción de abandono, que es valiosa especialmente cuando el VPN es marginal y tienen una alta posibilidad de generar pérdidas. Cuando la incertidumbre se despeja y los resultados no son atractivos, se puede abandonar el proyecto activo y dichas pérdidas pueden ser minimizadas por medio de la venta del activo por un valor residual o preferiblemente por contratos firmados con anterioridad. Bajo esta opción el perfil esperado de pagos de la opción de abandono es el valor de salvamento del proyecto menos el *strike price*, características especiales de una opción *put*¹⁶. Entonces tener una opción de abandono le da la opción al generante de elegir el valor máximo entre mantener activo el proyecto, o realizar el abandono de la inversión y obtener en cambio su valor de salvamento, como se muestra en la siguiente fórmula:

$$\text{Opción de abandono} = \text{Max} (\text{valor de salvamento}, \text{opción de mantener})$$

¹⁴ La simulación de Montecarlo es presentada en los anexos

¹⁵ En los anexos se presentan algunos tipos de opciones adicionales.

¹⁶ En los anexos se presentan las opciones financieras *call* y *put*, sus principales características, perfiles de pago y forma de estimación

▪ Opción de expansión

La opción de expansión es común en las empresas con altas tasas de crecimiento, sobre todo en la parte alta de los ciclos económicos. En el caso que algunos proyectos con un VPN inicial sea marginal o incluso negativo, pero que tiene oportunidades de crecimiento con un alto nivel de incertidumbre, la opción de expansión puede tomar un alto valor. Cuando no se considera la opción de expansión se pueden ignorar buenas oportunidades de crecimiento como consecuencia de una visión a corto plazo. En este caso la inversión asociada a la expansión se define como el perfil de pago del proyecto menos el *strike price* o el monto de inversión; para su estimación se hace uso de una opción *call*. En este caso el gerente tiene la opción de elegir en un momento determinado entre ejecutar la inversión o mantenerse en las condiciones actuales, como se presenta en la siguiente formula:

$$\text{Opción de expansión} = \text{Max} (\text{expandir} - \text{inversión}, \text{opción de mantener})$$

En la industria de petróleos esta es una opción que siempre está presente en los campos de producción, pues estos pueden implementar proyectos de inversión que aumente la producción existente del campo, pero que su implementación está sujeta al nivel de precios del petróleo.

▪ Opción de esperar

La opción de esperar es considerada también como la de diferir y está incluida en cada proyecto cuando existe alta incertidumbre y bajo esas condiciones el valor del proyecto es negativo o marginal; pero, en un futuro, si las incertidumbres se resuelven positivamente, es posible que éste pueda generar alto valor. Cuando los perfiles de pago exceden la inversión, la decisión sería invertir en ese momento o en el caso contrario no se realizaría esta inversión; estas características hacen que la opción de esperar sea una opción *call* o de compra. Estas opciones son interesantes cuando los accionistas o empresarios poseen derechos exclusivos sobre la tecnología y/o pueden generar barreras de entrada altas, es decir que los empresarios no perderían ingresos al momento de esperar en relación a los competidores. Entonces se ejerce la opción que sea la mayor entre esperar o expandir, como se muestra en la siguiente formula.

$$\text{Opción de esperar} = \text{Max} (\text{esperar}, \text{expandir})$$

▪ Opción de elegir

La opción de elegir es una opción un poco más compleja, que consiste en varias opciones combinadas en una sola opción. Dentro de las diferentes opciones se encuentran las de abandonar, expandir y contraer. Se llama opción de elegir porque se puede elegir seguir con la opción abierta y continuar con el proyecto o elegir ejercer entre la opción de expandir, contraer o abandonar. La ventaja de esta opción es que se puede maximizar el valor del activo según la opción elegida. Esta opción es única en el sentido que puede ser una opción *put*, en el caso de abandonar o contraer, y una opción *call*, en la opción de expansión.

$$\text{Opción de elegir} = \text{Max} (\text{mantener}, \text{contraer}, \text{expandir o abandonar})$$

Esta es una opción fundamental para la industria de hidrocarburos, ya que puede ayudar a los gerentes a tomar decisiones de una forma más eficiente sobre los proyectos y operaciones de los campos, ante fluctuaciones en los precios del petróleo o cuando se presenta un cambio en la estimación de reservas del mismo.

▪ Opciones compuestas

Muchos proyectos se caracterizan por presentar diferentes etapas o fases de inversión donde los gerentes pueden decidir expandir, mantener o abandonar el proyecto según se adquiera más información y se resuelva la incertidumbre. Los proyectos pueden comprender diferentes etapas donde una depende de otra, dichas etapas pueden ser obtener permisos, realizar diseños, hacer la ingeniería y finalmente la construcción, que también se pueden cambiar dependiendo la incertidumbre. Estas opciones son compuestas ya que al ejercer una opción genera otra, y se hace contingente el valor de una opción dependiendo del valor de otra, es decir que el valor de una opción se deriva del valor de otra opción y no de un activo, estas opciones pueden ser secuenciales o paralelas.

2.3. Opciones reales en la industria de hidrocarburos

Finalmente se presentará la revisión bibliográfica asociada al uso de la metodología de toma de decisiones usando opciones reales en la industria de hidrocarburos y el valor que han generado para el proceso de decisiones de inversión. El método más usado por las empresas para la toma de decisiones de inversión ha sido el de Valor Presente Neto (VPN).

No obstante, en los últimos años, en la industria petrolera, dada la alta volatilidad de los precios del petróleo, el alto riesgo asociado a la productividad de los yacimientos, la información limitada que se tiene de los proyectos y la existencia de diferentes escenarios de desarrollo, ha tenido la necesidad de buscar herramientas alternativas para la toma de decisiones, por esto ha sido pionera en la aplicación de opciones reales para decidir desarrollar o no diversos proyectos propios de la industria de hidrocarburos.

Al realizar una revisión de literatura, se puede encontrar la implementación de opciones reales de diversas naturalezas. Algunas de las aplicaciones las plantea Babajide, en 2007, quien analizó la opción de desarrollar o no un campo de petróleo, desde la perspectiva del cambio de la escala del desarrollo del proyecto, desarrollo de facilidades, cantidad de pozos a perforar, entre otros; lo cual permite analizar el valor agregado que puede traer la capacidad de ser flexible en el modelo de desarrollo (Babajide, 2007). En el caso de proyectos que requieren innovaciones tecnológicas para su explotación y que al ser valorados con VPN arrojan resultados negativos, Paddock, en 1988, usó la valoración de opciones para desarrollar un nuevo modelo de valoración de arrendamientos para un campo petrolero offshore (Paddock, Siegel, & Smith, 1988). C. Locatelli, en 2006, exploró diferentes estrategias de inversión de empresas petroleras en Rusia (Locatelli, 2006). Abadie y Chamorro en 2008 usaron el enfoque de Monte Carlo para evaluar la inversión en una reserva de gas natural (Abadie & Chamorro, 2008). Cortazar, Schwartz y Casassus, en 2001, desarrollaron un modelo con opciones reales aplicado a la optimización de inversión exploratoria bajo incertidumbre de precio y a la geología del yacimiento.

También se encuentra que grandes empresas de la industria petrolera han implementado opciones reales para tomar decisiones de inversión. A mediados de los 90, Chevron Texaco usó la metodología de opciones reales para definir su estrategia de inversión en un portafolio de campos petroleros ya desarrollados y otros en etapa exploratoria, buscando tener una mayor eficiencia de capital; ésta arrojó mayor valor al ser estimado con opciones reales, que por medio del portafolio valorado por VPN. BP, en 1991, usó opciones reales para definir un acuerdo de venta de 300 campos, al realizar una valoración *expost* se encontró que la valoración por medio de opciones reales fue mucho más cercana a la realidad que la valoración por medio de VPN. Anadarko usó la opción de esperar para el desarrollo de un campo offshore en aguas profundas, hasta que se encontrara disponible

el uso de una nueva tecnología de producción o usar la tecnología convencional (Bailey, Bhandari, Faiz, Srinivasan, & Weeds, 2004).

En estos documentos, todos los autores resaltan el valor agregado que genera la valoración de los proyectos por medio de las opciones reales ya que captura mejor la incertidumbre y es una herramienta flexible para la mejor toma de decisiones, además de ser una herramienta que les permitió generar una estrategia de crecimiento más eficiente, en el ambiente de incertidumbre y competencia, característico de la industria de hidrocarburos.

2.3.1. Principales fuentes de incertidumbre

Los proyectos e inversiones a realizar en la industria de hidrocarburos¹⁷ están sujetos a diversas fuentes de incertidumbre. Las dos incertidumbre principales están asociadas a la estimación de las reservas del campo y de los diferentes proyectos, la segunda son los precios del petróleo. Existen incertidumbres adicionales asociadas a la estructura de costos de capital a invertir y de los costos de operación, pero estas son un poco más fáciles de predecir. A continuación se realiza un análisis de las diferentes fuentes de incertidumbre.

En relación a la estimación de reservas se debe entender que este proceso inicia desde el descubrimiento de un campo petrolero en la etapa exploratoria, en este momento los geólogos, petrofísicos e ingeniero de reservas, realizan diversos estudios de subsuelo y superficie que permiten establecer la estrategia de producción y desarrollo del campo; para definir el volumen de reservas¹⁸, algunas de las estimaciones iniciales es la del Oil Initial in Place OIIP es decir el volumen inicial de petróleo en el yacimiento, después se define el posible factor de recobro que típicamente esta entre el 30% y 45%, es decir el volumen de petróleo que puede ser obtenido del campo basado en el OIIP.

Después de estimar las reservas del campo, las empresas de hidrocarburos deben determinar, la cantidad de pozos a perforar, que clase de pozos y el método de

¹⁷ Se le recomienda al lector revisar el siguiente link <http://www.ecopetrol.com.co/documentos/el-petroleo-y-su-mundo.pdf> en el que Ecopetrol desarrolla un documento muy resumido y de fácil entendimiento sobre la historia de la industria, las diferentes partes de la cadena de valor de esta y datos interesantes del sector.

¹⁸ Las reservas son cantidades de petróleo que se considera pueden ser recuperados comercialmente a partir de acumulaciones conocidas a una fecha futura. Todos los estimados de reservas involucran algún grado de incertidumbre. La incertidumbre depende principalmente de la cantidad de datos de ingeniería y geología, confiables y disponibles a la fecha del estimado y de la interpretación de estos datos (Oil Production.net, 2017)

levantamiento, además debe analizar que estructura construir en superficie para producir dichas reservas, es decir las facilidades de superficie, como tanques de tratamiento, oleoductos, oficinas, carreteras, etc., teniendo entonces clara la estrategia de desarrollo y producción del campo se estima el costo de realizar dichas actividades que es definido como el Capex, dependiendo de la estructura de las facilidades están pueden ser más o menos costosas, y dado que la incertidumbre asociada a las reservas cambia de proyecto a proyecto es necesario buscar la estructura de capex que sea efectiva pero también del costo adecuado para que sea económicamente viable dicho proyecto. Y por supuesto es una de las variables más importante para la estación de las opciones reales ya que el Capex es el mismo Strike Price.

Después basados en las estructuras y diseño de los procesos de operación del campo se procede a estimar el costo de operación Opex. Dado que el petróleo es un commodity donde las empresas son precio aceptantes, las empresas deben lograr tener una estructura de costos sea competitiva, de forma que se adapte con mayor facilidad a las fluctuaciones de los precios.

En la siguiente sección se presenta la metodología de reversión a la media que será el proceso estocástico con el que se proyectara el comportamiento de los precios de una forma probabilística.

▪ **Proyección de precios del petróleo**

Dado que este documento se enfoca en proyectos de inversión de la industria de hidrocarburos se debe estudiar con detenimiento el comportamiento de los precios del petróleo¹⁹, para esto se va a implementar el proceso estocástico con reversión a la media, que es el proceso recomendado por James Smith y Kevin F McCardle en su documento de *Opciones reales en el mundo real: lecciones aprendidas evaluando campos petroleros*, en este analizan el comportamiento de los precios del petróleo, identificando que en general cuando los precios están altos comparados con la media de largo plazo (o precio de equilibrio) incentiva el aumento de capacidad de producción y lleva a que los precios baje y converjan a la media; en el caso contrario cuando los precios están debajo de la media

¹⁹ En los anexos se presenta un análisis sobre el comportamiento histórico de los precios del petróleo

de largo plazo, los inventarios de barriles caen, se cierran algunos campos de producción y esto genera una menor oferta, que lleva nuevamente a que los precios retornen a la media.

En este modelo asume que el logaritmo de los precios del petróleo sigue un proceso Ornstein- Uhlenbeck,²⁰ proceso que fue seleccionado por su facilidad de implementación y por su adecuado ajuste de la data histórica y proyectada. A continuación se presenta la ecuación estocástica diferencial que explica dicho proceso:

$$d\pi(t) = k(\bar{\pi} - \pi(t))dt + \sigma_{\pi}dz_{\pi}(t)$$

Donde $\bar{\pi}$ denota la media a largo plazo a la que los precios logarítmicos reversion, k describe velocidad de ajuste del coeficiente de reversion a la media, σ_{π} describe la volatilidad del proceso, y $dz_{\pi}(t)$ representa los incrementos estándar del proceso con movimiento Browniano. Esto implica que dado $\pi(0)$, $\pi(t)$ esta normalmente distribuido con media $\bar{\pi} + (\pi(0) - \bar{\pi})e^{-kt}$ con varianza $\sigma_{\pi}^2(1 - e^{-2kt})/2k$. (Smith & McCardle, 1999)

Para lograr configurar la simulación es necesario obtener la ecuación en tiempo discreto del proceso. El correcto formato de tiempo discreto es el proceso estacionario autoregresivo de primer orden AR (1), donde la ecuación de simulación es:

$$\pi_t = \pi_{t-1}e^{-kt} + \bar{\pi}(1 - e^{-kt}) + \sigma_{\pi}\sqrt{\frac{1 - \exp(-1kt)}{2k}}N(0,1)$$

3. Diseño metodológico aplicado a la industria de hidrocarburos

Para iniciar el análisis de implementación de la metodología de opciones reales, es fundamental, conectar la estrategia corporativa con la búsqueda de creación de valor para la empresa y las opciones reales. Para esto se deben identificar las variables que generan valor en una oportunidad de inversión, como la fluctuación de los precios del petróleo, la

²⁰ Para obtener más detalles sobre este proceso estocástico dirijase al apéndice 1 del documento de James Smith y Kevin F McCardle *opciones reales en el mundo real: lecciones aprendidas evaluando campos petroleros*

oportunidad de explotar nuevos yacimientos, abandonar campos poco productivos y marginarles, optimizar la estructura de costos de operación y de inversión, entre otras; dado que estas variables son las que proveen una conexión entre la valoración cuantitativa y el proceso cualitativo de planeación estratégica. Algunos de los factores a analizar con una perspectiva estratégica son los que permiten tener una ventaja competitiva, la adaptación en capacidad y la posición estratégica.

Para que se logre esta alineación entre la estrategia y los métodos de valoración, se requiere que el enfoque de inversión capture los componentes de flexibilidad, las oportunidades de crecimiento futuras y los movimientos estratégicos que puedan apropiar los beneficios de dichas oportunidades de crecimiento y a la vez limitar el riesgo de pérdidas. Estos componentes contribuyen de forma significativa al valor de la empresa en un entorno incierto y competitivo (Trigeorgis & Smith, 2004).

Entonces teniendo claro que las opciones reales, son una herramienta que por un lado permiten capturar el valor estratégico de las oportunidades de crecimiento, por medio de las opciones de expansión y el valor de estrategias de adaptaciones en la capacidad como las opciones de contracción o abandono; y por otro lado que puede ser la mejor herramienta para la toma de decisiones de inversión en condiciones de alta incertidumbre, el paso a seguir es diseñar como se va a implementar dicha metodología. Para la correcta implementación de la metodología de valoración de opciones reales, es recomendable realizar las siguientes fases, que parten de un análisis cualitativo de escenarios estratégicos, hasta llegar al análisis del portafolio y optimización de recursos. Estas fases se diseñan según la investigación del marco teórico y considerando las necesidades propias de los proyectos petroleros. A continuación se listan las diferentes fases de análisis y en el desarrollo del modelo se realizar un análisis con mayor detenimiento.

1. Análisis cualitativo de escenarios estratégicos
2. Valoración del caso base por medio del análisis de VPN
3. Simulación de Monte Carlo
4. Análisis estratégico de opciones reales
5. Valoración de opciones reales y análisis
6. Análisis de portafolio y optimización de recursos

La optimización de portafolio es un paso opcional en este análisis. Este aplica para el caso en que se valoren múltiples proyectos y que la gerencia deba revisar los resultados como un portafolio; esto se da generalmente cuando existen restricciones en la disponibilidad de recursos de inversión de las empresas y/o restricciones en la capacidad de ejecución de muchos proyectos, entonces se requiere la optimización del portafolio de tal forma que se maximicen las ganancias y se diversifique y reduzca el riesgo. En el caso de optimización de portafolio se debe considerar el valor del proyecto con la metodología de opciones reales y también la volatilidad implícita del mismo.

4. Desarrollo del modelo

En esta sección se desarrolla un caso de negocio asociado a un proyecto de inversión de en un campo de producción de petróleo²¹ donde el objetivo es definir la mejor estrategia de gerencia del campo y, por lo tanto, tomar la mejor decisión de inversión, que permita maximizar las utilidades de la empresa, sujeto a las condiciones de incertidumbre propios de la industria. Para cumplir con este objetivo se desarrollará la metodología de opciones reales expuesta en el marco teórico y se implementará el proceso establecido en el diseño metodológico. Finalmente según los resultados obtenidos se realizará una recomendación para la empresa y se concluirá el valor práctico que puede generar el uso de esta metodología.

4.1. Análisis cualitativo de escenarios estratégicos

Este es el primer paso en el análisis de opciones reales, donde se identifica cuales proyectos, activos, iniciativas o estrategias son viables para estructurar, según la estrategia corporativa. Estos pueden incluir estrategias de mercado, procesos de optimización operativa y técnica, procesos de crecimiento, fusiones y adquisiciones, creación de sinergias, desinversión, etc.

La empresa sujeta a este análisis, y en general la industria de hidrocarburos, está transitando de una estrategia de optimización de costos a una de crecimiento en producción e incorporación de reservas de petróleo de forma rentable y confiable; esto considerando

²¹ La información sobre el campo está protegida por cláusula de confidencialidad.

que los precios del petróleo, durante el segundo semestre de 2016 y lo corrido del 2017, han presentado un comportamiento más estable, alrededor de los 50 dólares el barril. Dicha estrategia de crecimiento ha establecido diferentes frentes como los de aumentar la actividad exploratoria en offshore, implementar tecnologías de recobro secundario y terciario para mejorar la productividad de los campos, la compra de los campos, la renegociación de condiciones contractuales con socios, entre otras.

Evaluar un proyecto de Oil & Gas requiere visualizar el ciclo de vida completo de un campo de producción, estableciendo para cada etapa supuestos técnicos y económicos razonables. Sumado a esto, durante la vida del proyecto es preciso establecer y modelar los criterios que guiarán a la empresa a continuar o no en cada una de las etapas que componen un proyecto según los resultados que se van observando y según las condiciones de mercado. En general la industria debe tomar decisiones estratégicas de crecimiento como: la compra de campos, invertir en actividad exploratoria, invertir en nuevas tecnologías para mejorar la producción de los campos y estrategias de contracción; cuando se presenta un ciclo de precios bajos, se deben definir estrategias de optimización de costos, como las de cerrar pozos, dejar de inyectar agua y/o químicos y, en el peor escenario, abandonar campos marginales. A continuación se presenta una síntesis de las fases de desarrollo de inversión que aplican a campos de producción convencional, no convencional y offshore:

▪ **Exploración**

Durante la etapa de exploración, es necesario establecer el tipo de información que se desea recopilar, el costo y la secuencia de los trabajos. En esta fase se recopila y analiza información de subsuelo existente; y, de ser necesario, se adquiere nueva información sísmica y se perforan pozos stratigráficos y/o exploratorios verticales. Como resultado de esta fase se establecen los horizontes stratigráficos con potencial para producir hidrocarburos que serán objeto de perforación y estimulación en la siguiente fase del proyecto.

▪ **Producción**

Si en la fase anterior se obtiene información promisorio sobre la productividad del yacimiento, se plantea un proyecto de demostración comercial, en el cual se exploran prácticas de perforación y fracturamiento de pozos para buscar la mayor productividad al menor costo posible. Como resultado de esta fase se toma la decisión de realizar el desarrollo del campo. Durante la etapa de producción es necesario establecer un plan de desarrollo conceptual lógico y razonable en cuanto a número y costo de los pozos de desarrollo, cronograma de perforación, respuesta esperada del yacimiento, construcción de facilidades, construcción de líneas de evacuación, implementación de técnicas de recobro mejorado²², costos de operación, etc.

▪ **Abandono**

Finalmente cuando la producción de los campos ya no paga los costos fijos y variables, es decir, que no es económicamente viable y no es posible realizar trabajos adicionales para mejorar la productividad del yacimiento, la decisión es abandonar el campo, que es considerada como la fase final del mismo.

En la siguiente sección se presentará el plan de desarrollo de inversión del campo objeto de estudio que se encuentra en una etapa de producción y también se describirán las condiciones contractuales, información necesaria para tener la claridad sobre los proyectos de inversión.

4.1.2. Plan de desarrollo

Para el desarrollo del modelo se seleccionó un campo de petróleo con las siguientes características de producción, tiene un OIIP de 259 Millones de Barriles de Oil Equivalente MBOE y factor de recobro del 25% lo cual ya indica una alta producción histórica de

²² El "recobro mejorado" permite lograr la mayor extracción posible de petróleo en yacimientos sin presión natural o que llevan varios años de producción. Existen tres clases de recobro, recobro primario (energía natural), recobro secundario (como inyección de agua o gas) y recobro terciario (combustión en sitio, inyección de químicos o gases, entre otros), que demandan mayores tecnologías en la medida en que se pasa de una a otra.

petróleo, actualmente se encuentra en un esquema de producción con recobro secundario. El campo cuenta con 114 pozos de producción de petróleo y con 4 pozos de inyección de agua, lo cual le permite tener al campo, en 2017, una producción promedio año de 4.120 barriles de petróleo al día. El plan de desarrollo considera

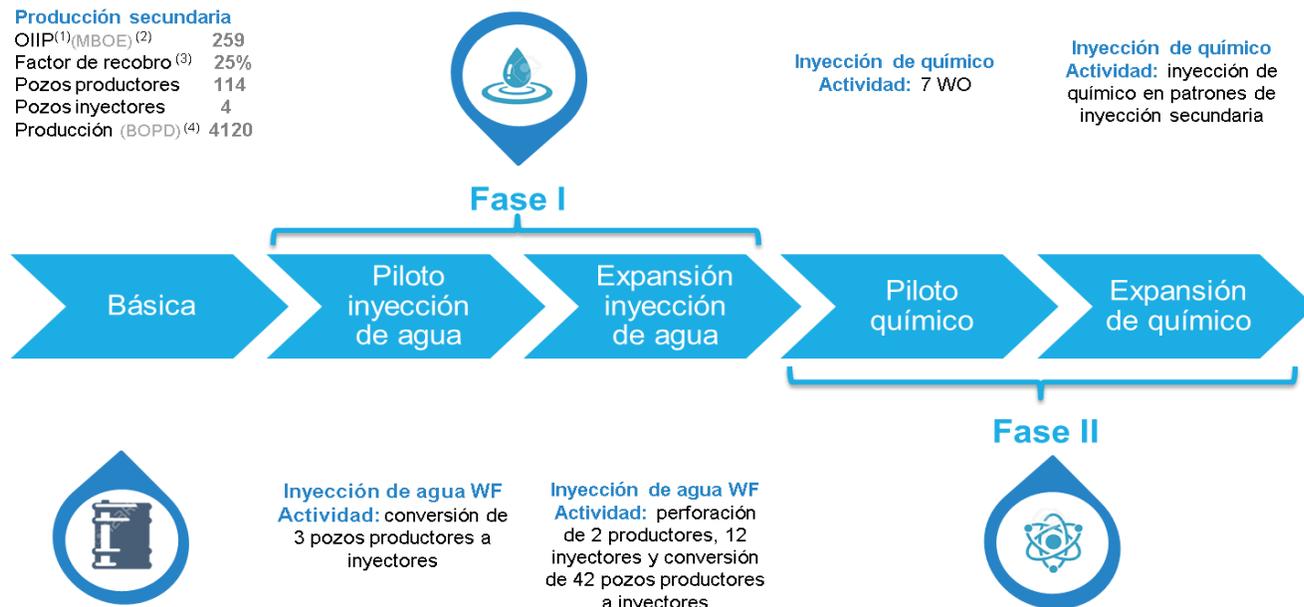
- La fase I que implementa nuevos patrones de inyección de agua. Para esto plantea un proyecto de realizar un pozo piloto de inyección que contempla la conversión de tres pozos productores a inyectores, este proyecto al ser un piloto se considera un estudio que puede no ser económicamente viable, dado que su objetivo principal es obtener información sobre la reacción del yacimiento al implementar la metodología de recobro secundario con inyección de agua. El segundo proyecto se da en caso que el piloto sea exitoso, en este caso se realizaría la expansión por medio de la perforación de dos pozos productores, 12 inyectores y la conversión de 42 pozos de productores a inyectores, este proyecto si debe ser económicamente viable ya que su objetivo es mejorar la producción del campo y por lo tanto mejorar los ingresos del campo.
- La fase II considera la implementación del recobro terciario por medio de la inyección de químico. Para esto plantea un proyecto de realizar un piloto de 7 Work Overs²³ (WO) en pozos inyectores de agua existentes donde se realizara la inyección de agua mezclada con el químico, este proyecto piloto al igual que el de inyección de agua busca obtener información sobre la respuesta del yacimiento a la implementación del recobro terciario. El segundo proyecto considera en el caso que el piloto arroje información exitosa, la expansión en inyección de químico en los patrones de inyección secundaria ya realizados, es decir sobre los 54 pozos inyectores.

El siguiente grafico muestra el resumen del plan de desarrollo y las actividades asociadas al campo.

²³ Un Workover se refiere a cualquier tipo de intervención de pozo de petróleo que involucra técnicas invasivas, tales como cableado, tubería enrollada o desaire, cuyo objetivo es aumentar la producción del pozo intervenido.

Ilustración 2 Plan de desarrollo de campo

Producción secundaria
 OIIP⁽¹⁾(MBOE)⁽²⁾ 259
 Factor de recobro⁽³⁾ 25%
 Pozos productores 114
 Pozos inyectoros 4
 Producción (BOPD)⁽⁴⁾ 4120



⁽¹⁾ Original oil in place: estimación de reservas totales del yacimiento; ⁽²⁾ Millones de barriles de oil equivalente; ⁽³⁾ Proporción de producción actual respecto el OIIP; ⁽⁴⁾ Barriles de oil promedio día

Fuente: Equipo técnico de yacimientos (2017)

4.1.3. Esquema contractual de operación

Las condiciones contractuales del campo a analizar es otra de las variables fundamentales al realizar una valoración financiera que permita tomar una decisión de inversión. La empresa es propietaria de los derechos de explotación de petróleo del campo, este actualmente cuenta con un contrato de producción incremental con la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH)²⁴ en el cual se tiene una curva de producción básica pactada que paga unas regalías del 32% y donde la producción incremental²⁵ que paga regalías del 8%.

²⁴ Cuando la empresa realiza proyectos de producción incremental la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) realiza una reducción en las regalías que fueron pactadas para el campo, lo cual es un incentivo a la inversión.

²⁵ La producción incremental es la producción adicional al plan establecido de producción en la básica pactada, la cual compromete un volumen de producción de forma mensualizada hasta el límite técnico de producción, que es el momento en que se estima el campo no producirá petróleo adicional.

Por otro lado la empresa tiene, sobre este campo, un contrato de sociedad con un tercero hasta 2023, que establece que la inversión en *capex* la realiza en un 100% el tercero, y la producción incremental y los costos operativos del campo se redistribuyen según un factor *r* de rentabilidad sobre la inversión (Ingresos acumulados/Egresos acumulados) que está pactado en el contrato. Además la empresa es la operadora del campo y el tercero únicamente está comprometido a realizar los aportes de capital para el *capex* de los proyectos. Frente a estas condiciones contractuales y la nueva coyuntura de precios bajos de la industria, el tercero no presenta un incentivo económico suficiente para ejecutar los proyectos de expansión del campo y por eso es de interés evaluar posibles opciones de negociación, de forma tal que permita maximizar la rentabilidad del campo.

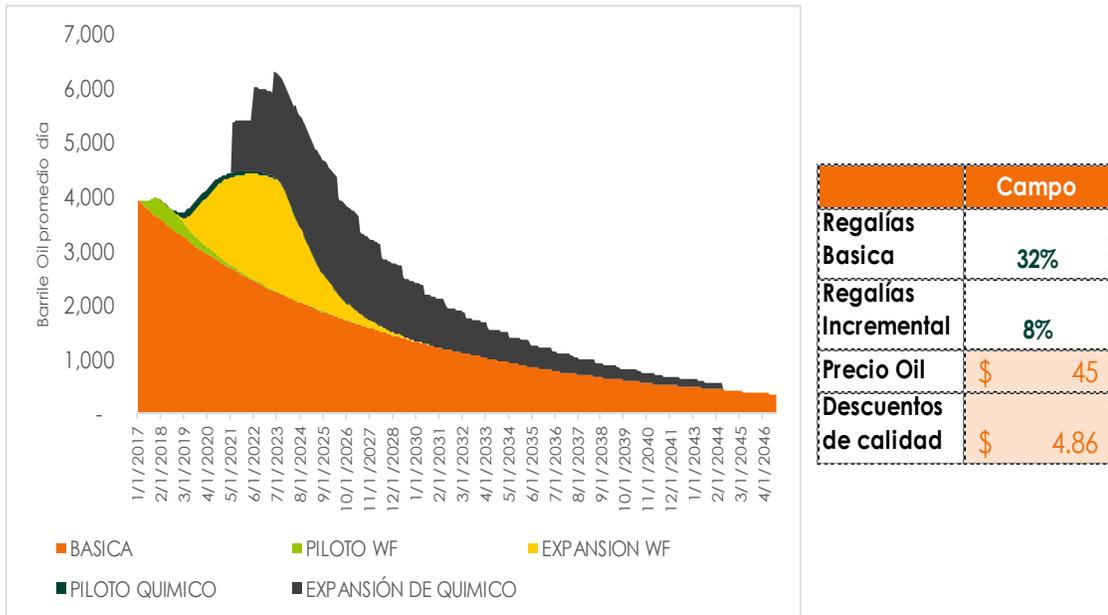
4.2. Valoración del caso base por medio de VPN

Después de analizar el plan de desarrollo de campo y cómo el proyecto se integra con las estrategias de inversión de la empresa, se debe construir el modelo de flujo de caja descontado, que es el caso base de análisis.

4.2.1. Estimación de ingresos

En la industria de petrolera los ingresos se calculan al multiplicar los perfiles de producción por los precios. Esto implica estimar las reservas asociadas al yacimiento, los perfiles de proyección asociado a cada proyecto y se debe definir un escenario determinístico de posibles de precios. En el siguiente grafico se presentan los perfiles de producción del plan de desarrollo presentados en la sección anterior y que serán usados en el caso determinístico, estos perfiles fueron construidos por el departamento de yacimientos de la empresa, los cuales llegan a una producción máxima de 6.000 barriles petróleo al día. En este caso como se mencionó en las condiciones contractuales, este campo le paga a la ANH unas regalías del 32% sobre la básica pactada que está representada por la curva naranja y unas regalías del 8% sobre los proyectos incrementales que están representadas en las demás curvas. Se establece un precio del petróleo para todo el análisis de \$45 dorales por barril, además para realizar la estimación de los ingresos también se deben restar los descuentos por calidad del crudo asociados a los grados API de este, en este caso es de \$4.8 por barril.

Ilustración 3 Perfiles de producción, regalías, precio del petróleo



Fuente: Equipo técnico de yacimientos (2017)

4.2.2. Estimación del capital de inversión y costos de operación.

Otra variable de análisis que requiere especial atención es la estimación del *capex* y *opex*, ya que impacta considerablemente el valor del proyecto y se puede llegar a determinar que este no es viable cuando estos son muy altos.

Ahora bien, el costo de inversión es único para cada proyecto y esto requiere que un equipo de trabajo interdisciplinario los estime. Las principales clases de costos de la industria petrolera son: estudios, sísmica, perforación de pozos exploratorios, delimitadores, de producción, inyectores, entre otros, trabajos de WO, gerencia de proyectos, facilidades, compra de terrenos, inversión social, inversión ambiental y todos los que sean necesarios para que el proyecto sea exitoso. Por otro lado, según la metodología de *project management*, existen estimados de costos de clase 1 a la 5, donde un estimado de costos de clase 5 es el de la etapa más temprana de definición del programa o proyecto y un estimado de costos clase 1 es el calculado cuando el proyecto ya está definido. Tener clara la clase de estimado correspondiente a cada fase del proyecto, es fundamental para la correcta estimación de las opciones reales, ya que permite establecer el rango de incertidumbre asociado a las posibles funciones de probabilidad.

En la siguiente grafico se presenta el capex, que fue estimado para cada fase de inversión por el departamento de proyectos de la empresa. En este caso el estimado de capex es de clase 2 es decir que se realizaron ingenierías básicas para su estimación.

Ilustración 4 Capex de proyectos por año



Fuente: Equipo técnico de yacimientos (2017)

Por otro lado los costos de operación de un campo petrolero están relacionados con el costo de levantamiento del petróleo, que pueden ser el mantenimiento de pozos, tratamiento de fluidos, almacenamiento y los costos fijos asociados a la administración del campo. En la siguiente tabla se presenta el costo asociado a producir 1 barril de petróleo, factor que se obtiene al estimar la masa monetaria para cada variable relacionada al opex y posteriormente dividida por los barriles de producción. Como se puede ver en la tabla este valor cambia mucho por cada fase de inversión, ya que este depende de la tecnología de producción elegida. Para este proyecto los costos de operación son asumidos por las dos partes de la sociedad, en cambio el capex es asumido por el socio hasta el 2023, como se muestra en la tabla.

Tabla 1 Capex y Opex del proyecto

	Año de inversión	CAPEX (Millones de dolares)			OPEX (USD/Barril de Oil)
		PROYECTO	EMPRESA	SOCIO	PROYECTO
BASICA	Operación	2.2	0.0	2.2	0.1
PILOTO WF	2017	2.9	0.0	2.9	8.1
EXPANSION WF	2018	100.7	0.0	100.7	16.5
PILOTO QUIMICO	2018	7.7	0.0	7.7	42.6
EXPANSIÓN DE QUIMICO	2021	48.8	2.0	46.8	6.6
TOTAL PRY INCREMENTALES		160.1	2.0	158.1	18.5

Fuente: Equipo técnico de yacimientos (2017)

4.2.3. WACC y valoración con VPN

Finalmente se debe estimar la tasa de descuento a la que se debe descontar correctamente este flujo de caja y así calcular el VPN del mismo. La siguiente ilustración presenta los supuestos usados para hallar la tasa de descuento apropiada asociada a este proyecto, que es estimada según la metodología de WACC, en este caso el costo del patrimonio fue el elegido por la Junta Directiva de la empresa que se basa en el CAPM.

Tabla 2 Tasa de descuento apropiada WACC

Costo del Patrimonio exigido por JD	15.00%
Costo de la Deuda	
Costo de la Deuda (antes de impuestos)	8,67%
Tasa de Impuestos	33%
Costo de Deuda Después de Impuestos	5.80%
Deuda/Mkt Cap	12,1%
Tasa de Descuento Nominal	13,89%
Inflación USA	2.5%
Tasa de Descuento Real	11.1%

Fuente: Gerencia de inversiones y portafolio (2017)

Finalmente la siguiente ilustración presenta los principales resultados de la valoración de la inversión para los diferentes flujos de caja y los principales indicadores de desempeño financiero y técnicos, la estimación del VPN y la construcción de los flujos de caja fueron estimados por la autora y se encuentran en el Excel anexo a este documento.

Ilustración 5 Resultados de la valoración de la inversión VPN



Fuente: Elaboración propia (2017)

Tabla 3 Resultados de la valoración de la inversión Eficiencia de la inversión

EFI (VPN/VP CAPEX)	PROYECTO	EMPRESA	SOCIO
BASICA	65.4	-	18.7
PILOTO WF	1.8	-	0.5
EXPANSION WF	0.7	-	(0.1)
PILOTO QUIMICO	(0.6)	-	(0.8)
EXPANSIÓN DE QUIMICO	0.5	44.7	(0.9)
TOTAL PRY INCREMENTALES	0.6	117.2	(0.3)

Fuente: *Elaboración propia (2017)*

Con esta información se pueden obtener las siguientes conclusiones: en total el plan de desarrollo de este campo requiere una inversión en valor presente VPI de \$160 millones de dólares (MUSD) y presenta una economía positiva de \$73 (MUSD). En el caso que el proyecto se realizara en las condiciones contractuales actuales este generaría para la empresa un VPN de \$112,9 (MUSD) y solo tendría que realizar una inversión en 2024 de 2 (MUSD) asociado a la ejecución del proyecto de expansión de químico, ya que se deben ejecutar inversiones adicionales después de la finalización del contrato. En el caso que el socio estuviera obligado a realizar las inversiones asociadas a este plan de desarrollo tendría que realizar una inversión de \$158.1 (MUSD) y dado que el contrato se termina en diciembre de 2023 no alcanzaría a recuperar la inversión y presentaría un VPN negativo de \$(38.9) (MUSD); dadas las condiciones del contrato actuales, el socio no se encuentra obligado a realizar inversiones adicionales, ya que los proyectos incrementales no son económicamente viables para este, dado que el único que puede realizar inversiones es el socio, la empresa bajo las condiciones actuales no puede realizar el plan de desarrollo.

Este caso de negocio es un buen candidato para evaluar con la metodología de opciones reales dado que, se deben analizar opciones de desarrollo y negociación que permitan realizar la ejecución del plan de desarrollo. Donde inicialmente se identificó que por un lado bajo las condiciones contractuales actuales, la empresa no puede realizar las inversiones del proyecto y además aunque pudiera hacerlo, dado que al evaluar este proyecto de inversión en el portafolio de la empresa, no es competitivo en relación a otros proyectos que tienen una eficiencia sobre la inversión (VPN/VP *capex*) mayor a 1 y este proyecto tiene una eficiencia de 0.6, por lo tanto no sería interesante realizar la compra del activo.

4.3. Simulación de Monte Carlo

Realizar las simulaciones de Montecarlo es el primer paso que se debe realizar para iniciar el análisis de opciones reales. Dado que los proyectos de la industria de Oil & Gas se desarrollan en una dinámica de incertidumbre, se pueden identificar diferentes orígenes de riesgo, originados en la estimación de las reservas, los precios, el Capex y el Opex, como se presentó en el marco teórico. En esta sección se presentaran los supuestos usados para realizar la simulación de Montecarlo de las diferentes variables ya mencionadas, que impactan el VPN del plan de desarrollo y con las que se estimará la volatilidad del mismo.

4.3.1. Simulación de reservas

Para estimar las reservas del yacimiento, se debe considerar en cual fase de desarrollo se encuentra el campo petrolero e información como la sísmica, producción histórica de pozos perforados, el cálculo del *OIIP*, el factor de recobro actual del campo, el diseño de la campaña de perforación e información físico química disponible del campo, entre otros. Con esta información se puede definir una función de distribución adecuada, para establecer los posibles perfiles de producción. Es fundamental aclarar que en el caso que el activo se encuentre en etapa exploratoria la incertidumbre será superior a la que se encuentre en una etapa de producción; y que en el caso que se implemente una nueva tecnología de recobro la incertidumbre también será mayor que en un escenario de producción con una tecnología ya conocida.

Los perfiles de producción para este plan de desarrollo fueron generados por el departamento de yacimientos de la empresa, este mismo equipo definió que la distribución de probabilidad para los perfiles de producción es la de lognormal y en la siguiente tabla se presenta un resumen de los parámetros de media, desviación estándar de la producción acumulada para cada fase de desarrollo y la correlación entre las fases de desarrollo. También se presenta como cada fase contribuye a tener un mayor factor de recobro del yacimiento y que en total lleva a producir el 36.8% de las reservas del yacimiento, que es el valor de recobro teórico aceptado en la industria para esta clase de campos.

Tabla 4 Supuestos perfiles de producción para la simulación de Monte Carlo

FASE DE INVERSIÓN	FACTOR DE RECOBRO	MEDIA (Millones Barriles de Oil)	DESVIACION ESTANDAR (Millones Barriles de Oil)	CORRELACION
OOIP		256		
PRODUCCION ACUMULADA	26.0%	66.56		
BASICA	6.1%	15.69	0.8	
PILOTO WF	0.1%	0.36	0.1	0.5
EXPANSION WF	2.4%	6.11	0.9	0.9
PILOTO QUIMICO	0.1%	0.18	0.1	0.6
EXPANSIÓN DE QUIMICO	2.0%	5.25	1.0	0.9
TOTAL PRODUCCION	36.8%	94.15	2.9	

Fuente: Elaboración propia (2017)

4.3.2. Simulación de los precios del petróleo

Los precios del petróleo se caracterizan por presentar una alta volatilidad, afectados por cambios en la demanda y oferta de este recurso. En los anexos se presentan los principales acontecimientos que han impactado los precios en la historia. Como se mencionó en el marco teórico, se implementará el proceso estocástico con reversión a la media. Para esto se estableció como rango de la muestra el periodo de enero de 2001 a marzo de 2017. La siguiente tabla muestra los supuestos de entrada para la simulación.

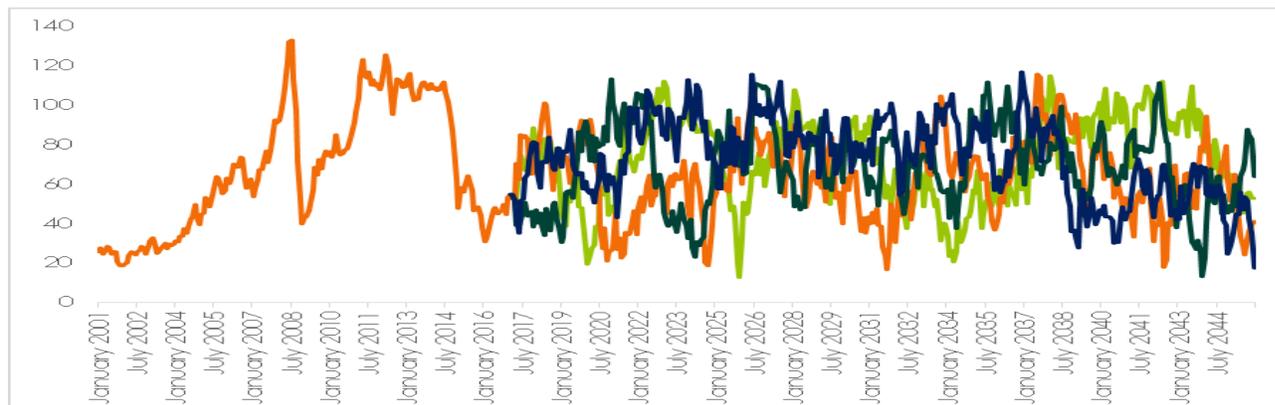
Tabla 5 Supuestos simulación de precios del petróleo con regresión a la media

Media Precio del crudo (USD/BO)	66.72
S Precio del crudo (USD/BO) Marzo 2017	51.59
σ	31.82
η	1.0
dt	0.083

Fuente: Elaboración propia (2017)

En la siguiente grafica se muestran algunas de las simulaciones que se obtienen de las iteraciones realizadas con Crystal Ball y la regresion a la media.

Ilustración 6 Simulación de precios del petróleo



Fuente: Elaboración propia (2017)

4.3.3. Simulación de capex

Al tener un estimado base para la inversión del proyecto se puede establecer una función de distribución probabilística basados en información histórica de proyectos ya ejecutados y la clase de costo que corresponda; en este caso se implementa una distribución de probabilidad triangular²⁶, donde los parámetros se definieron según la variación de los capex de proyectos anteriores de la región. En la siguiente tabla se presentan los supuestos asumidos.

Tabla 6 Supuestos simulación capex con distribución de probabilidad triangular

FASE DE INVERSIÓN	MINIMO (Millones de dolares)	MEDIA (Millones de dolares)	MAXIMO (Millones de dolares)	CORRELACION ENTRE FASES (Unidades)
BASICA	2.1	2.2	2.3	0.0
PILOTO WF	2.8	2.9	3.2	0.4
EXPANSION WF	95.6	100.7	115.8	0.9
PILOTO QUIMICO	7.3	7.7	9.1	0.7
EXPANSIÓN DE QUIMICO	46.4	48.8	60.5	0.9

Fuente: Elaboración propia (2017)

4.3.4. Simulación de opex

Los costos de operación están altamente correlacionadas con el perfil de producción y también con el nivel de precios del petróleo, para realizar la proyección de estos se tuvo en

²⁶ es decir, que asumen un valor mínimo, uno máximo y una media

cuenta información histórica de los costos de producción del campo y de proyectos similares en la zona. Para los costos de operación asociados a cada fase de desarrollo, se definió la distribución de probabilidad triangular. En la siguiente tabla se presentan los supuestos asumidos.

Tabla 7 Supuestos simulación opex con distribución de probabilidad triangular

FASE DE INVERSIÓN	MINIMO (USD/Barril l de Oil)	MEDIA (USD/Barril l de Oil)	MAXIMO (USD/Barril l de Oil)	CORRELACIO N
BASICA	0.1	0.1	0.2	0.0
PILOTO WF	7.8	8.1	9.0	0.4
EXPANSION WF	15.8	16.5	18.1	0.9
PILOTO QUIMICO	40.9	42.6	47.7	0.7
EXPANSIÓN DE QUIMICO	6.0	6.3	7.0	0.9

Fuente: *Elaboración propia (2017)*

4.4. Análisis estratégico de opciones reales

El siguiente paso es definir el problema en el contexto de opciones reales. Después de identificar el problema a resolver durante la etapa de análisis cualitativo, se pueden identificar las posibles opciones inmersas en el proyecto o decisión de inversión. Estas opciones estratégicas pueden incluir la opción de expandir, contraer, abandonar y elegir, además se pueden establecer opciones compuestas. Para esta oportunidad de negocio, se proponen diferentes alternativas estratégicas que pueden ser implementadas por la gerencia y la forma en que se debe valorar por medio de opciones reales cada una:

- La primera estrategia planteada es la de Mantener las condiciones contractuales y no desarrollar más el campo: esta requiere de una opción de mantener o abandonar el campo. Para la opción de mantener se asume el valor de la básica de la empresa y como abandono se asume un valor de salvamento del 10%²⁷ del valor de la básica.
- La segunda alternativa es comprar la participación al socio y desarrollar el campo: esta es requiere la implementación una opción de expansión en la que se debe

²⁷ Costo promedio de venta de campos similares cuando las reservas ya no se pueden explotar de forma rentable, este dato fue entregado por el equipo de proyectos

comprar la participación del socio y construir una opción compuesta de las diferentes fases del plan de desarrollo.

- La tercera alternativa contempla esperar al vencimiento del contrato y desarrollar el campo después: esta sería una opción de espera y después se debe construir la opción compuesta de las diferentes fases de desarrollo.

Finalmente se debe construir una opción de elegir entre las diferentes alternativas, que permita concluir que alternativa genera más valor y cuál sería el valor adicional que genera tener la flexibilidad de elegir entre estas alternativas. En la siguiente grafica se presenta como se hará uso de las opciones reales para evaluar las diferentes alternativas de inversión.

Ilustración 7 Análisis estratégico de opciones reales

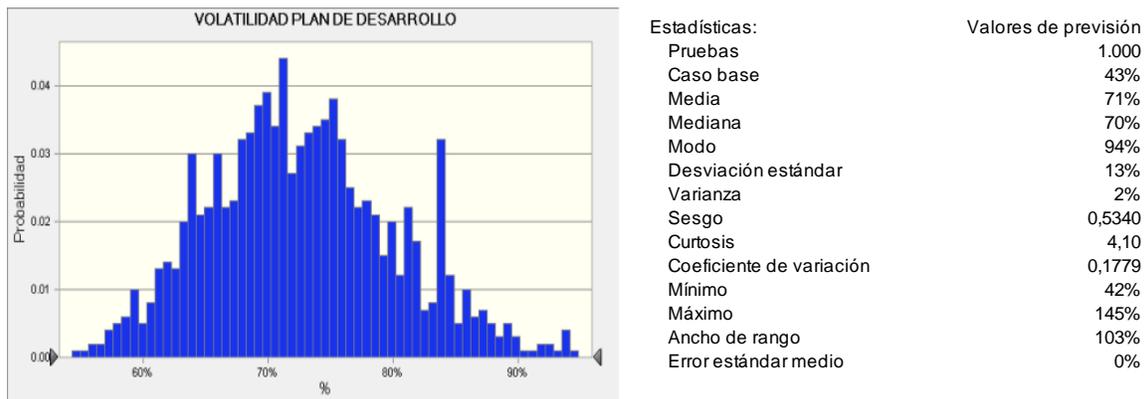


Fuente: Elaboración propia (2017)

4.5. Valoración de opciones reales

En esta sección se desarrollara la estimación de las opciones reales, planeadas en el análisis estratégico de la sección anterior y en los resultados de la valoración con VPN ya realizados, ya que en el análisis de opciones reales se asume que el valor del activo subyacente es igual al VPN determinístico del mismo. El siguiente paso es estimar la volatilidad implícita de los flujos de caja, que es calculada por medio de los resultados obtenidos en la simulación de Monte Carlo y hallando la desviación estándar de los retornos logarítmicos de este, según la formula definida en la sección 2.2 de este documento, el resultado arrojado por el software Crystal Ball fue de $\sigma = 71\%$. El siguiente grafico presenta los resultados de la simulación de Monte Carlo para hallar la volatilidad.

Ilustración 8 Simulación de volatilidad implícita de los retornos logarítmicos



Fuente: Elaboración propia (2017)

Después se inicial el cálculo de la metodología de árboles binomiales por medio de las probabilidades neutrales al riesgo, que permite hallar el valor de las diferentes opciones reales. En este caso se asume que la tasa libre de riesgo es la de los Bonos del tesoro de Estados Unidos a 30 años que para el 5 de mayo de 2017 era de 3,01%²⁸. Con estos inputs estimados se realiza el cálculo de las opciones para las diferentes alternativas de inversión que tiene el tomador de decisiones para maximizar el valor de su activo, que serán presentados en la siguiente sección.

4.5.1. Mantener las condiciones contractuales y no desarrollar más el campo

Esta alternativa estratégica representa el escenario actual de gestión que tiene la empresa en relación a este activo, que es mantener las condiciones contractuales y no desarrollar más el campo. Para evaluar esta alternativa se selecciona la opción de mantener o abandonar el campo. Para estimar esta opción se debe estimar el árbol binomial asociado al valor de la básica que le corresponde a la empresa, que fue registrado en la ilustración 6, equivalente a \$97.2 millones de dólares, para esto se toma el valor $up=2.03$ que fue estimado con la formula presentada en la sección 2.2 y se estima el nodo

²⁸ Se elige esta tasa de interés, ya que el límite económico del proyecto se extiende aproximadamente hasta el año 2045, es decir 28 años aproximadamente, y porque todo el proyecto está valorado en dólares.

El primer paso es estimar el valor de la opción de compra de la participación del socio, donde se asume:

- El socio no va invertir en el plan de desarrollo y por lo tanto no va a crear valor adicional frente el VPN esperado de la básica que tiene hasta el 2023, es decir que el precio de compra sería de \$38,8 MUSD²⁹
- El crecimiento en valor de la empresa al realizar la compra de la básica sería del 40%, que se obtiene al calcular el valor de la básica de la empresa \$97.2 MUSD sobre el valor de la básica completa que es de \$136 MUSD
- Dado que esta opción se expira con la terminación del contrato en 2023 se establecen 7 pasos para realizar la estimación

Después basado en el árbol binomial de evolución de la básica de la empresa que se presentó en la ilustración 10, se estima el valor de comprar como el valor de los nodos de la séptima iteración y se elige el valor máximo entre el valor de dicho nodo de mantener o el de comprar.

$$\text{Opcion de expansión} = \text{Max} (\text{valor de mantener}, \text{opcion de comprar})$$

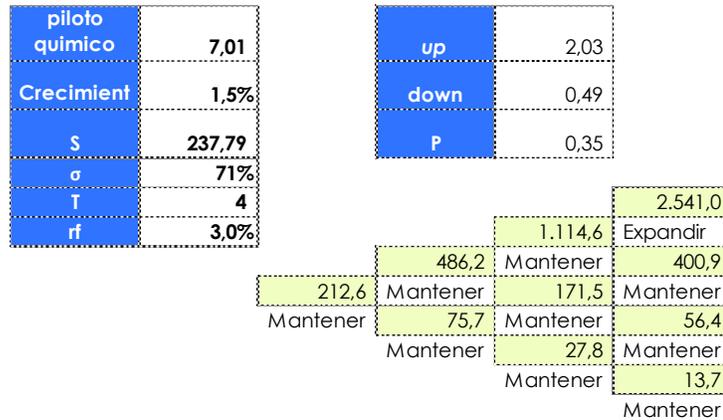
Un ejemplo de cálculo de la opción de expansión, es tomar el primer nodo del periodo 7 que es SoU= \$6.880 MUSD y multiplicarlo por 40% y restar la inversión de \$38,8 MUSD, lo cual arroja el valor en la opción de compra de \$9.589 MUSD en dicho nodo, que a su vez es el máximo al compararlo con la opción de mantener que es \$6.880, por eso la decisión sería comprar; el resto de nodos del periodo 7 se calculan de forma similar. Después usando el proceso de inducción hacia atrás, que es tomar los valores maximizados de los nodos del periodo 7 y aplicar la fórmula de probabilidad neutra al riesgo, se halla el valor de dicha opción que se presenta en la siguiente gráfica.

²⁹ Valor registrado en la ilustración 6 como el VPN de la Básica del Socio

$$\text{Opción de expansión} = \text{Max} (\text{valor de mantener}, \text{opción realizar el piloto de químico})$$

Usando el proceso de inducción hacia atrás, se halla el valor de dicha opción que se presenta en la siguiente gráfica.

Ilustración 15 Valoración opción de expansión piloto de inyección de químico



Fuente: Elaboración propia (2017)

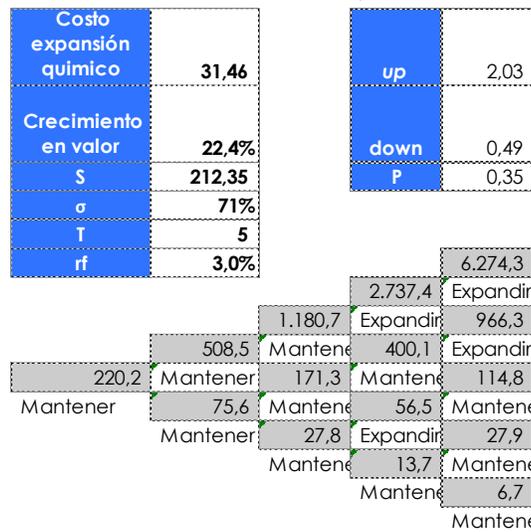
En este caso el valor del activo después de realizar la expansión sería de \$212 MUSD que es menor a \$237 MUSD de la opción de mantener, por lo cual la decisión sería mantener el activo en las condiciones actuales. Pero dado que este es un piloto de inyección de químico si la expansión de químico genera suficiente valor como para pagar las inversiones de la expansión y las de este piloto, la recomendación sobre esta fase podría cambiar, por lo cual el siguiente paso es continuar con la valoración de la expansión.

La opción de expansión de inyección de químico, depende del éxito técnico de la expansión de inyección de agua, ya que el resultado económico de este fue negativo. La expansión de químico requiere una inversión de \$31,4 MUSD que se puede ejercer al año siguiente de la ejecución del piloto y genera un crecimiento en valor sobre la opción de mantener el activo después de la expansión del 22,4%. El siguiente paso es construir el lattice binomial extendido de mantener el activo sobre el piloto de inyección de químico con los factores exponenciales del up y down. Después se realizan los cálculos de la opción de expansión de inyección de químico donde se elige el valor máximo entre el valor de dicho mantener el activo con el piloto de químico o realizar la expansión de inyección de químico.

$$\text{Opción de expansión} = \text{Max} (\text{valor de mantener}, \text{opción expansión de químico})$$

Usando el proceso de inducción hacia atrás, se halla el valor de dicha opción que se presenta en la siguiente gráfica.

Ilustración 16 Valoración opción de expansión inyección de químico



Fuente: Elaboración propia (2017)

Después de realizar la expansión de químico el valor del activo sería de \$220 MUSD que es menor a \$237 MUSD de la opción de mantener el activo con la expansión de inyección de agua, es decir que tampoco se recomienda ejercer la fase II del plan de desarrollo que considera la inyección de químico. Para que esta fase fuera viable es necesario optimizar los costos de inversión asociados a esta y esperar a que se resuelva la incertidumbre técnica y de precios que permita en un futuro considerar esta opción.

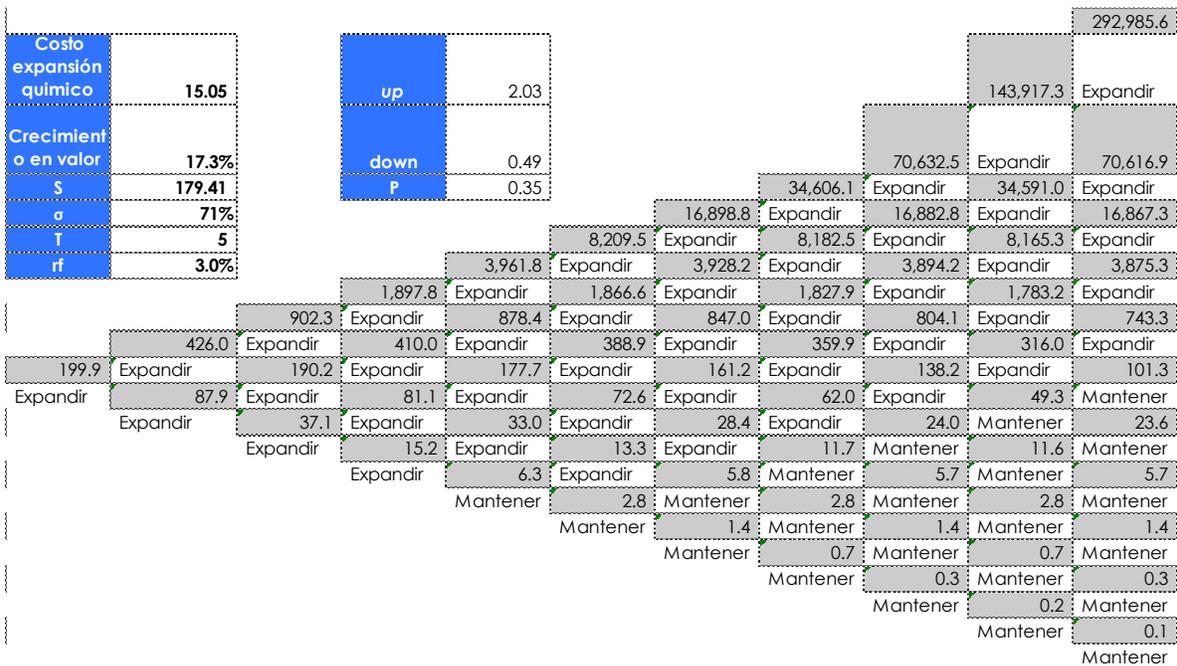
En conclusión la recomendación para esta alternativa es realizar la compra de la participación del socio y ejecutar la Fase I de inyección de agua en el campo.

4.5.3. Esperar al vencimiento del contrato y desarrollar el campo después

Esta alternativa de negocio considera la opción de esperar al vencimiento del contrato en 2023, en el que el socio no realizará inversiones adicionales y la empresa tampoco, pero se define que después de dicho año se van a realizar las inversiones asociadas al plan de desarrollo. La valoración de esta alternativa implica la construcción de la opción de espera y una posterior opción compuesta, ya que las diferentes fases de desarrollo dependen del éxito de la fase anterior y estas a su vez de la opción de espera al vencimiento del contrato.

La opción de esperar en este caso es equivalente al caso de mantener o abandonar presentada en la sección 4.5.1. Ahora bien la opción compuesta asociada al plan de desarrollo del campo después de 2023, se realiza bajo los mismos supuestos de cálculo de la sección 4.5.2 con tres diferencias, una es que se realizan los cálculos de expansión iniciales sobre la opción de mantener o en este caso de esperar, la segunda es que se realizan las expansiones a partir del periodo 8, y la tercera es que valores de inversión asumen iguales pero se traen a valor presente desde el periodo 8. La siguiente grafica muestra los resultados arrojados para el último árbol binomial de la opción compuesta que es el de expansión de inyección de químico, en el caso que considere revisar los cálculos, estos los puede verificar en el anexo del modelo realizado en Excel MODELO OPCIONES REALES PARA EL SECTOR DE HIDROCARBUROS.

Ilustración 17 Valoración opción de expansión inyección de químico



Fuente: Elaboración propia (2017)

En este caso el valor del activo después de realizar la expansión hasta la fase de expansión de químico sería de \$167 MUSD que es mayor a \$149 MUSD de la opción de mantener la expansión de inyección de agua y a su vez es mayor que es caso de esperar y no desarrollar que sería de 97,2. Según estos resultados la recomendación sería realizar todas las fases de expansión del plan de desarrollo. En este caso se puede ver como los resultados de una

presenta una eficiencia en la inversión de 1.43 que es mayor a 1, lo cual la hace competitiva en el portafolio de inversión de la empresa.

4.6. Análisis de resultados y recomendaciones

La implementación de la metodología de opciones reales le permitirá a la gerencia incorporar en el proceso de decisiones de inversión de capital, un análisis estratégico que considere diferentes alternativas de estructurar los proyectos y posibles negocios, que arroje una recomendación clara; además le permite considerar el valor de los proyectos bajo las condiciones de la incertidumbre intrínseca en estos y por supuesto valorar la flexibilidad que tiene la gerencia de cambiar los proyectos durante la vida de estos y según se va resolviendo la incertidumbre.

En la siguiente tabla se presenta una comparación entre los resultados arrojados por medio de opciones reales y la metodología tradicional de estimación con VPN

Tabla 8 Resultados de valoración de opciones reales y VPN

FASES DEL PROYECTO	VPN		OPCIONES REALES	
	COMPRAR Y EXPANDIR	ESPERAR Y EXPANDIR	COMPRAR Y EXPANDIR	ESPERAR Y EXPANDIR
BASICA	97.2	97.2	121.5	97.2
PILOTO WF	5.2	2.5	5.5	7.1
EXPANSION WF	56.0	26.8	110.8	75.2
PILOTO QUIMICO	(4.2)	(2.0)	(25.4)	(4.6)
EXPANSIÓN DE QUIMICO	16.0	7.7	(17.6)	20.5
TOTAL PRY INCREMENTALES	170.1	132.1	237.8	199.9

Fuente: Elaboración propia (2017)

De esta tabla se puede evidenciar que la valoración por medio de opciones reales arroja un valor superior a la realizada por medio de VPN, también se evidencia que al valorar por medio de opciones reales la compra de la básica del socio, arroja un valor adicional en relación del estimado con el VPN, generando un incentivo para ejecutar esta opción de expansión; en ambos casos la alternativa de comprar la participación del socio y después ejecutar el plan de desarrollo es mayor a la alternativa de esperar el vencimiento del

contrato y después desarrollar, lo que confirma la recomendación de comprar la participación del socio.

Se recomienda a la empresa la implementación de la metodología de opciones reales a todo el portafolio de inversiones, de forma que pueda optimizar el mismo considerando las diferentes volatilidades de estos y las opciones que brinden flexibilidad en la gestión, con el fin de maximizar utilidades y de paso elegir un portafolio con menor riesgo. Para esto se puede consultar el documento de Valuation of Real Options Portfolio (Bravo, Mogollon, & Parra, 2007)

5. Conclusiones

La industria de hidrocarburos está sujeta a diferentes fuentes de incertidumbre como los precios del petróleo y la productividad de los yacimientos. Por esta razón, la valoración por medio de VPN puede arrojar resultados negativos o marginales según los criterios de la empresa y llevar a la conclusión de que es mejor no ejecutar un proyecto. Al aplicar la metodología de opciones reales alineada con la estrategia corporativa, se puede incorporar la incertidumbre a la valoración por medio de la volatilidad estimada, y por otro lado, se puede asignar un valor cuantitativo a las estrategias cualitativas y a la flexibilidad que tiene el tomador de la decisión de cambiar el proyecto durante el desarrollo del mismo. Esto hace de las opciones reales una herramienta más robusta para la toma de decisiones que el VPN por considerar estos factores. Pero, igualmente, como se argumentó en el marco teórico, estas dos metodologías son complementarias entre sí.

Con relación al proyecto que se evaluó en este documento, se implementaron diferentes tipos de opciones: expansión, abandono y espera, y las opciones más complejas que son las compuestas y las de elegir. Los resultados de estas opciones permitieron valorar diferentes estrategias de negocio y realizar una recomendación clara: comprar la participación del socio, desarrollar el campo hasta la fase I de inyección de agua y esperar a optimizar el proyecto de la Fase II o a que se tengan mejores condiciones de mercado, en especial de los precios del petróleo. Además, por medio de la valoración de opciones reales, los resultados arrojados para la compra de la participación del socio y la Fase I son mayores que los obtenidos con VPN y permiten cumplir con el requerimiento de eficiencia

de la inversión mayor a 1 que tiene la empresa, es decir, la decisión de inversión se puede tomar con mayor claridad y es positiva.

Es interesante ver cómo en la valoración por medio de opciones reales, en la alternativa de comprar al socio y después desarrollar, la Fase II de inyección de químico arroja resultados negativos y en una proporción mayor que en la valoración con VPN. Esto se puede interpretar como que bajo las condiciones en que está estructurado el proyecto, esta fase es muy riesgosa y por lo tanto se recomienda reestructurar el proyecto de tal forma que se optimicen los costos o esperar y tomar la decisión después, cuando la incertidumbre se resuelva. Esto es coherente con los resultados arrojados en la alternativa de esperar, en la cual la Fase II arroja resultados positivos.

En relación con la dificultad de implementación de la metodología de opciones reales, lo que implica mayor complejidad es proyectar los precios del petróleo pues es preciso tener conocimiento estadístico en el uso de procesos estocásticos, además de configurar correctamente las funciones de distribución para las curvas de producción, lo cual requiere del conocimiento técnico del campo; estos son los principales inputs para estimar la volatilidad. Por otro lado, construir los arboles binomiales y el cálculo de las diferentes opciones es fácil desde que se tenga clara la estrategia de inversión y la relación entre las diferentes fases de desarrollo.

Una desventaja clara de la metodología de opciones reales frente los métodos tradicionales es que no son muy conocidos por los gerentes, lo cual dificulta una implementación más generalizada en las empresas y hace más compleja la sustentación de la valoración y la recomendación de inversión. No obstante, es algo que se puede solucionar por medio de capacitaciones y de la alineación de la estrategia corporativa, de naturaleza cualitativa, con la valoración de las opciones reales, que aporta el valor cuantitativo a las estrategias. Así, es posible que la gerencia le dé mayor valor al uso de esta metodología.

Finalmente, por medio de este documento se puede concluir que la metodología de opciones reales es adecuada para valorar proyectos de inversión bajo incertidumbre como los de la industria de hidrocarburos; que esta metodología es complementaria a la del VPN y que permite valorar de forma cuantitativa la estrategia corporativa, la incertidumbre y la flexibilidad que tienen los gerentes para tomar decisiones.

Bibliografía

- A new view of investment. (1994). En A. Dixit, & R. Pindyck, *Investment under Uncertainty* (págs. 3-23). New Jersey: Princeton University Press.
- Abadie, L. M., & Chamorro, J. M. (2008). Monte Carlo valuation of natural gas investments. *Review of Financial Economics*, 10-22.
- Abel, A. B., & Eberly, J. C. (diciembre de 1994). A Unified Model of Investment Under Uncertainty. *The American Economic Review*, 84(5), 1369-1384.
- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2013). *Produccion de Hidrocarburos*. Bogotá: ANH.
- Babajide, A. (2007). *Real Options Analysis as a Decision Tool in Oil Field Developments*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- Bailey, W., Bhandari, A., Faiz, S., Srinivasan, S., & Weeds, H. (2004). Unlocking the value of real options. *Oilfield Review*.
- Banco de la Republica . (2016). *Boletín de indicadores económicos*. Bogotá: Banrep.
- BERNANKE, B. S. (Febrero de 1983). IRREVERSIBILITY, UNCERTAINTY, AND CYCLICAL INVESTMENT. *The Quarterly Journal of Economics*, 98(1), 85-106.
- Black, F., & Scholes, M. (1973). The Pricing of Options and Corporate Liabilities. *Journal of Political Economy*.
- BP. (2014). <http://www.bp.com>. Recuperado el 01 de 12 de 2014, de http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/Energy-Outlook/BP_World_Energy_Outlook_booklet_2035.pdf
- Bravo, O., Mogollon, L. A., & Parra, J. D. (2007). Valuation of a Reak Options Portfolio. *Ecopetrol*.
- Carruth, A., Dickerson, A., & Henley, A. (1998). What do we know about investment under uncertainty? *ESRC Research Grant*, 1-38.

- Copeland, T., & Antikarov, V. (2001). *Real Options: A Practitioner's Guide*. Texere, New York.
- Couet, W. B. (2002). Valoración de opciones reales. *Valoración de opciones reales*, Valoración de opciones reales.
- Damodaran, A. (2005). Valuation Approaches and Metrics: A Survey of the Theory and Evidence. *Foundations and Trends R in finance*, 693–784.
- Damodaran, A. (2006). The Promise and Peril of Real Options. *Stern School of Business*.
- Dixit, A., & Pindyck, R. (1994). A new view of investment. En *Investment under Uncertainty* (págs. 3-23). New Jersey: Princeton University Press.
- Fedesarrollo. (2016). *Informe de coyuntura petrolera*. Bogotá: Fedesarrollo.
- FEDESARROLLO. (2016). *Informe de coyuntura petrolera*. Bogotá: FEDESARROLLO.
- Hens, T., & Rieger, M. O. (2010). Decision Theory. En T. Hens, & M. O. Rieger, *Financial Economics; A concise introduction to classical and behavioral finance* (pág. 15). Berlin: Springer.
- Hens, T., & Rieger, M. O. (2010). *Financial Economics*. Zurich: Springer.
- Kodukula, P., & Papudesu, C. (2006). *Project Valuation Using Real Options*. J. Ross Publishing, Inc.
- Locatelli, C. (2006). The Russian oil industry between public and private governance: obstacles to international. *Energy Policy*, 1075-1085.
- Lombardi, D. (2009). Business investment under Uncertainty and irreversibility. *Oxonomics*, 25-31.
- Lombardi, D. (2009). Business Investment under Uncertainty and Irreversibility. *Oxford University and Brookings Institution*, 1-7.
- Lopez, E., Montes, E., Garavito, A., & Collazos, M. M. (2012). La economía petrolera en Colombia. *Borradores de Economía*.

- López, E., Montes, E., Garavito, A., & Collazos, M. M. (2013). *La economía petrolera en Colombia Parte II*. Bogotá: Banco de la Republica.
- Mun, J. (2002). *Real Options Analysis*. John Wiley & Sons, Inc.
- Myers, S. (1984). Finance Theory and Financial Strategy. *INTERFACES*, 126-137.
- Oil Production.net. (24 de 08 de 2017). <http://oilproduction.net>. Obtenido de <http://oilproduction.net/reservorios/evaluaciondereservorios/item/1686-definicion-de-reservas-petroleras>
- Paddock, J. L., Siegel, D. R., & Smith, J. L. (1988). Option valuation of claims on real assets: the case of offshore petroleum leases. *The Quarterly Journal of Economics*, 479-508.
- Parsons, J. E., & Mello, A. S. (2009). Measuring Risk Dynamic Models. *MIT*.
- Penman, S. H. (2009). *Financial Statement Analysis and Security Valuation 4ed*. Mc Graw Hill Education.
- Putten, A. B., & MacMillan, I. (2004). Making Real Options Really Work. *Harvard Business Review*.
- ROMER, D. (1996). La inversión. En D. ROMER, *ADVANCED MACROECONOMIC* (pág. 392). Mc Graw Hill.
- Schwartz, E. S., & Trigeorgis, L. (2011). Real Options and Investment under uncertainty: An Overview. *MIT press*.
- Smith, J. E., & McCardle, K. F. (1999). Options in the real world: lessons learned in evaluating oil and gas investments. *Operation research*.
- Trigeorgis, L., & Smith, H. (2004). Strategic Investment: Real Options and Games. *Princeton University Press*.

Lista de figuras

Ilustración 1 árbol binomial recombinado	17
Ilustración 2 Plan de desarrollo de campo	32
Ilustración 3 <i>Perfiles de producción, regalías, precio del petróleo</i>	34
Ilustración 4 <i>Capex de proyectos por año</i>	35
Ilustración 5 <i>Resultados de la valoración de la inversión VPN</i>	36
Ilustración 6 <i>Simulación de precios del petróleo</i>	40
Ilustración 7 <i>Análisis estratégico de opciones reales</i>	42
Ilustración 8 <i>Simulación de volatilidad implícita de los retornos logarítmicos</i>	43
Ilustración 9 <i>Evolución binomial de la básica de la empresa</i>	44
Ilustración 10 <i>Valoración con modelo binomial de la opción de mantener o abandonar</i>	45
Ilustración 11 <i>Valoración opción de comprar participación del socio</i>	47
Ilustración 12 <i>Valoración opción de expansión piloto de inyección de agua</i>	48
Ilustración 13 <i>Valoración opción de mantener el activo con el piloto de inyección de agua</i>	48
Ilustración 14 <i>Valoración opción de expansión inyección de agua</i>	49
Ilustración 15 <i>Valoración opción de expansión piloto de inyección de químico</i>	50
Ilustración 16 <i>Valoración opción de expansión inyección de químico</i>	51
Ilustración 17 <i>Valoración opción de expansión inyección de químico</i>	52
Ilustración 18 <i>Valoración opción de elegir</i>	53

Ilustración 20 Perfil de pagos opción call	68
Ilustración 21 Perfil de pagos opción put	69
Ilustración 22 Comportamiento histórico de los precios del petróleo	75

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 Capex y Opex del proyecto	35
Tabla 2 Tasa de descuento apropiada WACC	36
Tabla 3 Resultados de la valoración de la inversión Eficiencia de la inversión	37
Tabla 4 Supuestos perfiles de producción para la simulación de Monte Carlo	39
Tabla 5 Supuestos simulación de precios del petróleo con regresión a la media	39
Tabla 6 Supuestos simulación capex con distribución de probabilidad triangular ..	40
Tabla 7 Supuestos simulación opex con distribución de probabilidad triangular	41
Tabla 8 Resultados de valoración de opciones reales y VPN	54

ANEXOS

Modelos de valoración intrínseca

Modelo Flujos de caja libre de la Firma

El VPN es usado para tomar diferentes decisiones de inversión. Por ejemplo se puede valorar una firma para decidir comprarla, venderla o mantenerla, donde se considera el valor de los activos existentes y los posibles activos de crecimientos, a continuación se presentan los supuestos para esta valoración:

El valor de la firma se obtiene descontando los flujos de caja libre al WACC (Weighted Average Cost of Capital). Esta metodología para estimar la tasa de descuento adecuada fue desarrollada en uno de los artículos más citados en finanzas corporativas que es el de Modigliani y Miller (1958). Allí, el supuesto fundamental es que los inversionistas de capital y los prestamistas de una firma son socios que suplen las necesidades de capital de la misma y al final perciben las utilidades de forma compartida. Además, este modelo considera el valor terminal de la empresa según el modelo de Gordon, cuya fórmula es la siguiente:

$$\text{Valor del Firm} = \sum_{t=1}^{t=\infty} \frac{FCFF_t}{(1 + WACC)^t} + \frac{FCFF_{n+1}/(WACC - g_n)}{(1 + WACC)^n}$$

Donde

$FCFF_t = \text{ingresos operacionales despues de impuestos} - (\text{Inversiones de capital} - \text{Depreciaciones})$
 $- \text{cambios en el capital de trabajo sin caja}$

$WACC = \text{Costo promedio ponderado de capital}$

$g_n = \text{tasa de crecimiento contante}$

En el caso que se quiera hallar el valor del patrimonio desde este modelo, solo debe restarse la deuda.

Una empresa también se puede valorar por medio del modelo de dividendos descontados y el modelo de excesos de rentabilidad EVA, que son presentados en los anexos.

- **Modelo Flujos de caja libre de proyectos**

Una alternativa de decisión de inversión puede estar asociada al desarrollo de proyectos³⁰. Para este análisis, es importante tener clara la forma de estimación del valor de los proyectos, ya que en este documento se realizará la estimación del plan de desarrollo de un campo petrolero, que se compone de diferentes proyectos. El proceso de estimación de un proyecto es diferente al de una empresa, pues no considera un valor terminal dado que los proyectos son finitos. A continuación se presenta la fórmula para realizar la valoración:

$$VPN \text{ del proyecto} = \sum_{t=1}^{t=\infty} \frac{\text{Flujos de caja libre en etapa de producción}_t - \text{Costos de Inversión}_t}{(1 + WACC)^t}$$

En este caso es fundamental identificar los costos de inversión del proyecto (Capex: Capital expenditure), los ingresos y costos de la etapa de producción (Opex: Operating expenditures) que determinan los flujos libres en etapa de producción, para después hallar el flujo de caja libre al descontarle las depreciaciones, impuestos e intereses (Kodukula & Papudesu, 2006).

- **Flujos de caja esperados E (VPN)**

Una forma extendida de los modelos de valoración intrínseca, ya sea aplicada a la valoración de la firma o de proyectos para tomar una decisión de inversión, es la de flujos de caja esperados, donde **los flujos de caja se analizan desde una perspectiva probabilística**, donde se busca reflejar el riesgo del proyecto por medio de un posible rango de valor. La herramienta generalmente usada para este análisis es la simulación de Montecarlo, que permite simular miles de posibles escenarios de proyecto, que al final genera una curva de probabilidad del mismo (Kodukula & Papudesu, 2006). Para hacer este análisis es necesario **definir la distribución de probabilidad** para variables inputs que están sujetas a una alta incertidumbre, puede ser el Capex, Opex, ingresos, precios etc. Después se asigna el valor promedio y desviación estándar en función a información histórica disponible para esta variable. Finalmente usando un software de simulación como

³⁰ Según el PMBook un proyecto es un esfuerzo que se lleva a cabo para crear un producto, servicio o resultado único, y tiene la característica de ser naturalmente temporal, es decir, que tiene un inicio y un final establecidos, y que el final se alcanza cuando se logran los objetivos del proyecto

Crystal Ball, se configuran las variables input con las distribuciones elegidas y se define como variable de salida el VPN, para finalmente encontrar la distribución del mismo y el posible rango de valor.

- **Modelo de dividendos descontados**

El **modelo de dividendos descontados** que es considerado como la variación más antigua de los modelos de flujos de caja descontados, y es usada principalmente para estimar el valor de empresas que transan en el mercado de valores, considera que el valor del activo es determinado por el valor presente de los dividendos futuros descontada al costo del equity. A continuación se presenta la ecuación de este método:

$$\text{Valor del Equity} = \sum_{t=1}^{t=\infty} \frac{E(DPS_t)}{(1 + Ke)^t} + \frac{Pn}{(1 + Ke)^n}$$

Donde: $E(DPS_t)$ = dividendos esperados por acción en el periodo t y

Ke = costo del equity

$$Pn = \frac{E(DPS_{n+1})}{(Ke - g)}$$

Generalmente el costo de capital o del equity es determinado por el nivel de riesgo del activo, y existen diferentes modelos de estimación, como el beta del mercado en el modelo CAPM. Este modelo puede presentar variaciones, como **considerar la tasa de crecimiento a perpetuidad** en el caso que una empresa entregue los dividendos que pueda pagar y de una manera constante, este fue desarrollado por Myron Gordon en 1962 y que también es utilizado en la estimación del valor terminal de un activo.³¹

- **Modelo exceso de rentabilidad EVA**

En este modelo se separan los flujos de caja en exceso de rentabilidad y los flujos de caja normales, bajo este modelo se requiere que las ganancias y el crecimiento de los flujos de caja, solo tienen valor cuando generan excesos en los retornos, es decir que los retornos

³¹ Modelo de Gordon

sobre el equity exceden el costo de capital. En este caso, Damodaran considera que el modelo apropiada es el de EVA (Economic value added), que es considerado como una extensión a la regla del valor presente neto, como se muestra a continuación

$$\begin{aligned} EVA &= (\text{Retornos en el capital invertido} - \text{costo de capital})(\text{capital invertido}) \\ &= \text{ingresos operacionales despues de impuestos} - (\text{costo de capital})(\text{capital invertido}) \end{aligned}$$

$$VPN = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{EVA_t}{(1 + kc)^t}$$

En este caso el valor de la firma se considera como el valor de los activos en el lugar más el valor esperado del crecimiento futuro y puede ser calculado como el valor presente neto de cada uno de estos componentes:

$$\begin{aligned} \text{Valor de la firma} &= \text{capital invertido en activos en el lugar} + \sum_{t=1}^{t=n} \frac{EVA_{t, \text{activos en el lugar}}}{(1 + kc)^t} \\ &+ \sum_{t=1}^{t=n} \frac{EVA_{t, \text{futuros proyectos}}}{(1 + kc)^t} \end{aligned}$$

Modelos de valoración relativa

Los modelos de valoración relativa son usados para hallar rápidamente el valor de una empresa o proyecto de inversión, de tal forma que permita comparar el valor hallado con el de empresas y/o proyectos similares y así tomar la decisión de comprar, vender o esperar. El supuesto fundamental de esta metodología es asumir que el mercado asigna el precio correcto a las empresas, para esto se estima el valor de un activo en función a activos similares que están listados en el mercado de valores. Los pasos a seguir de esta metodología son tres: primero, encontrar los activos comprables que están incluidos en el mercado de valores, preferiblemente deben ser del mismo sector económico; el segundo paso, escalar el precio de mercado a una variable común³², de forma que genere un precio estandarizado sea comparable, que puede ser una relación en función a un múltiplo de las ganancias, el valor en libros, los ingresos, el EBITDA, entre otros (las fórmulas de estos

³² En los anexos se presentan los principales múltiplos que se usan para realizar la valoración comparable

múltiplos se presentan en los anexos); el último paso, hallar el valor del activo deseado al multiplicar el valor estandarizado elegido por el factor hallado de la empresa comparable, aun así en algunos casos se pueden realizar ajustes basados en el análisis de los fundamentales, como el crecimiento de las compañías.

- **Price to earnings**

El múltiplo más común es el precio sobre las ganancias, que pueden ser las ganancias de los últimos 4 trimestres o en función a las ganancias esperadas para el siguiente año.

$$\text{Price to Earnings (PE)} = \frac{\text{valor de mercado del equity}}{\text{ganancias}}$$

- **Price to EBITDA**

Otro múltiplo usado en operaciones de compra de un negocio es el Price to EBITDA, que son los ingresos operacionales o ganancias antes de intereses, impuestos, depreciaciones y amortizaciones:

$$\text{Price to EBITDA (PEB)} = \frac{\text{valor de mercado del equity}}{\text{EBITDA}}$$

- **Price to books**

El múltiplo de Price to books se usa principalmente para identificar que tan sub o sobrestimada se encuentra una acción en relación a su valor en libros del equity

$$\text{Price to Book (PB)} = \frac{\text{valor de mercado del equity}}{\text{valor en libros del equity}}$$

- **Price to sales**

Un múltiplo que permite una mejor comparación de empresas, es el Price to sales ya que no está sujeto a las metodologías contables de las empresas

$$\text{Price to sales (PS)} = \frac{\text{valor de mercado del equity}}{\text{ventas}}$$

- **Valor en libros**

En este proceso es importante identificar cómo se estima el valor de los activos según su naturaleza. Al respecto, se han establecido algunas reglas como: **para activos fijos se ha concluido que el valor en libros** refleja correctamente el valor, donde se toma el costo original del activo y se resta la depreciación asociada; para **activos corrientes se considera como una mejor alternativa el valor de mercado**; y finalmente, se han incluido otras variables como los **intangibles**, como marca, el *good will* y el *know how* (Damodaran, 2005). Después de tener el costo correcto, el valor de la empresa o proyecto se estima como:

$$\text{Valore del patrimonio} = \text{valor de los activos} - \text{valor de la deuda}$$

Según Damodaran esta metodología de valoración se recomienda para empresas que tiene una mayor proporción de activos fijos, pocas oportunidades de crecimiento y bajo potencial de grandes utilidades.

Ecuaciones de diferencias parciales – Black-scholes

Este método implica solucionar ecuaciones diferenciales parciales, sujetas a restricciones específicas, como el tipo de opción y los valores extremos del valor de las opciones, estas ecuaciones diferenciales miden el cambio en el valor de una opción en función a los cambios de diferentes variables de los proyectos (ingresos, precios, costos, etc). (Kodukula & Papudesu, 2006).

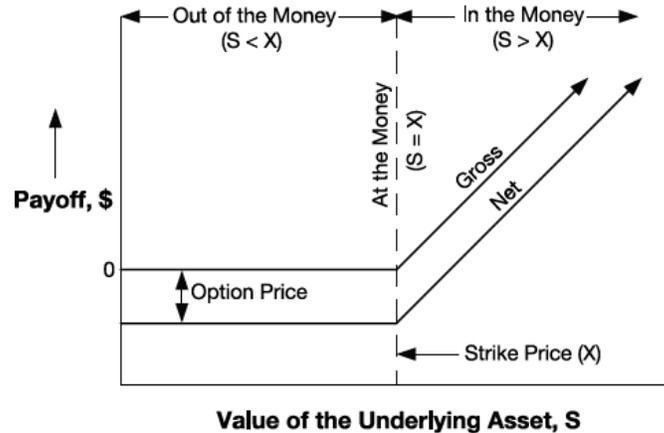
El modelo de Black-Scholes Publicado en 1973, usa modelos de procesos estocásticos³³ y ecuaciones diferenciales para hallar el valor de las opciones. A continuación es necesario definir los tipos de opciones, según Black-sholes *“Una opción es un seguro que da el derecho de comprar o vender un activo, sujeto a determinadas condiciones, en un periodo específico de tiempo. Una opción americana es la que se puede ejercer en cualquier momento antes de que la opción se expire. Una opción europea es la que solo puede ser ejercida en una fecha específica futura. El precio que es pagado por el activo cuando la*

³³ Un proceso estocástico, es una descripción parsimoniosa de la dinámica que rigen la evolución de las variables, donde captura a largo plazo las tendencias, como lo puede ser un comportamiento estructura de la serie o aleatorio en los precios, y captura corto plazo las fluctuaciones estacionales, así como los choques repentinos de los precios, lo que permite realizar estimaciones y cuantificar el riesgo.

opción sea ejercida es llamado, *strike Price*. El último día en el que la opción puede ser ejercida es llamado la *fecha de expiración*" (Black & Scholes, 1973)

En una **opción Call u opción de compra**, si en la fecha de expiración el valor del activo es menor que el *strike Price*, la opción no es ejercida y el *payoff* de esta se hace negativo e igual al precio pagado por la opción call. En caso contrario, si el valor del activo es mayor que el *strike Price*, la opción es ejercida y la ganancia es la diferencia entre el valor del activo, el *strike Price* y el valor de la opción call. (Damodaran, *The Promise and Peril of Real Options*, 2006) Dicho perfil de pago se muestra en la siguiente gráfica:

Ilustración 19 Perfil de pagos opción call



(Kodukula & Papudesu, 2006)

El modelo de Black-Scholes fue diseñado para valorar opciones europeas, que no pagan dividendos. El valor de una Call option, puede ser escrita como la siguiente función:

$$Call = S \times N(d_1) - X \times e^{-rt} \times N(d_2)$$

Donde:

S = es el valor actual de activo subyacente

X = Strike price o precio de ejercicio de la opción

t = tiempo de expiración de la opción

$r =$ tasa de interes libre de riesgo correspondientes a la duracion de la opcion

$N(d_1)$ y $N(d_2) =$ valores de la distribucion normal estandar de d_1 y d_2

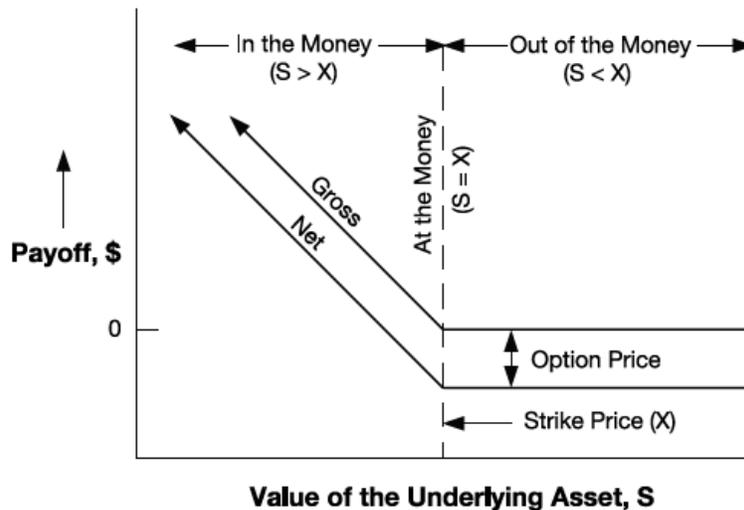
$$d_1 = \frac{\ln\left(\frac{S}{X}\right) + \left(r + \frac{\sigma^2}{2}\right)t}{\sigma\sqrt{t}}$$

$$d_2 = \frac{\ln\left(\frac{S}{X}\right) + \left(r - \frac{\sigma^2}{2}\right)t}{\sigma\sqrt{t}} = d_1 - \sigma\sqrt{t}$$

$\sigma =$ varianza o volatilidad del precio activo subyacente

En una **opción Put u opción de venta**, si en la fecha de expiración el valor del activo es menor que el strike Price, la opción es ejercida y la ganancia es la diferencia entre el strike price y valor del activo. En el caso que el valor del activo sea superior al strike price esta no será ejercida y la pérdida será igual al valor de la opción put. (Damodaran, The Promise and Peril of Real Options, 2006) Dicho perfil de pago se muestra en la siguiente gráfica:

Ilustración 20 Perfil de pagos opción put



(Kodukula & Papudesu, 2006)

La opción put en el modelo de Black-Scholes es descrita de la siguiente manera:

$$Put = X \times e^{-rt} \times N(-d_2) - SN \times N(-d_1)$$

Metodologías de estimación de volatilidad

- **Valor presente logarítmico**

Este método construye dos escenarios de valor presente, donde los flujos de caja son descontados a una misma tasa, luego el primer flujo se descuentan al periodo 0 y el segundo al periodo 1, finalmente se toman los dos VPN y se calculan en el siguiente ratio de logaritmo:

$$volatilidad = \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^n PVCF_i}{\sum_{i=0}^n PVCF_i} \right)$$

Donde $PVCF_i$ es el valor presente de los flujos de caja futuros. Para esta metodología también se puede usar la simulación de Montecarlo para los cálculos de los flujos de caja, lo cual le permite establecer una distribución de probabilidad para la volatilidad.

- **Enfoque GARCH**

El modelo GARCH (Generalizado Heteroscedástico autorregresivo condicional), se usa para estimar la volatilidad de los flujos de caja, este modelo requiere tener una gran cantidad de datos históricos, para que el estimador de volatilidad sea significativo. Un modelo GARCH (1,1), toma la siguiente forma:

$$y_t = x_t \gamma + \varepsilon_t$$

$$\sigma_t^2 = \omega + \alpha \varepsilon_{t-1}^2 + \beta \alpha_{t-1}^2$$

Donde la primera ecuación y_t está en función a variables exógenas x_t con un término de error ε_t . La segunda ecuación estima la varianza σ_t^2 al tiempo t, que depende de la media histórica de ω noticias sobre la forma de la volatilidad de periodos pasados, medido como el retraso de los residuos al cuadrado para la media de la ecuación ε_{t-1}^2 , y la volatilidad de periodos anteriores α_{t-1}^2 . Este modelo requiere una fortaleza econométrica considerable que no hacer parte del alcance de este documento.

- **Enfoque de supuestos de la gerencia**

En este enfoque, el gerente estima un escenario optimista S_{Opt} , pesimista S_{Pes} , y promedio S_0 , para un proyecto en el tiempo t . Se asume que el perfil de pagos sigue una distribución normal, después se debe asumir valores para dos de los tres escenarios mencionados, finalmente la volatilidad se puede hallar con las siguientes ecuaciones:

$$volatilidad = \frac{\ln\left(\frac{S_{Opt}}{S_0}\right)}{2\sqrt{t}}$$

$$volatilidad = \frac{\ln\left(\frac{S_{Opt}}{S_{Pes}}\right)}{2\sqrt{t}}$$

$$volatilidad = \frac{\ln\left(\frac{S_0}{S_{Pes}}\right)}{2\sqrt{t}}$$

Enfoque de proxy de mercado

Un método comúnmente usado para estimar la volatilidad es usar la información disponible de mercado, se eligen empresas que transan sus acciones en la bolsa de valores y son consideradas como comparables, después se estima la desviación estándar sobre los logaritmos naturales de los retornos de las empresas seleccionadas. Finalmente se debe ajustar el valor de las acciones únicamente al equity sin deuda, como se muestra en la siguiente formula:

$$\sigma_{RO} = \frac{\sigma_{Equity}}{1 + \frac{D}{E}}$$

El problema con este método es asumir que el riesgo inherente a las empresas comparables es igual al riesgo del proyecto que se está valorando.

Movimiento Browniano

La siguiente ecuación representa el movimiento browniano exponencial:

$$\frac{\delta S}{S} = e^{\mu(\delta t)} e^{\sigma \varepsilon \sqrt{\delta t}}$$

La parte determinística del modelo $e^{\mu(\delta t)}$ explica la pendiente o tasa de crecimiento del modelo browniano, y el término estocástico $e^{\sigma \varepsilon \sqrt{\delta t}}$, que tiene el componente de la volatilidad σ , el tiempo δt y el componente de simulación ε^{34} , explica el comportamiento aleatorio.

Simulación de Monte Carlo

La simulación de Montecarlo se basa en el movimiento browniano para generar valores aleatorios de las variables, basado en distribuciones de probabilidad (Mun, 2002). En este caso se realiza la simulación de miles de flujos de caja, donde el factor de volatilidad se calcula para cada simulación sobre los retornos logarítmicos, lo cual provee una distribución de estos factores y no solo un dato. Este modelo es el más robusto para realizar el análisis de volatilidad en opciones reales, ya que ofrece una distribución del factor de volatilidad y no un solo dato, reduciendo el margen de error. (Kodukula & Papudesu, 2006)

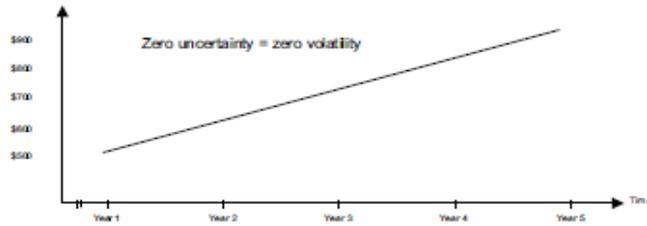
³⁴ Mun en su libro de real options análisis realiza una comparación entre este modelo estocástico y la relación con el modelo binomial en el capítulo 6.

Deterministic Case

$$Y_{t+1} = \alpha + \beta X_t$$

$$Y_t = \alpha + \beta T_t$$

REGRESSION ANALYSIS
TIME SERIES ANALYSIS

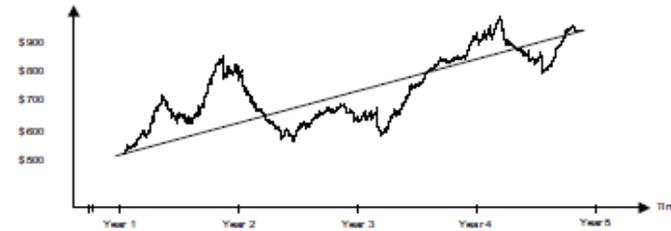


Stochastic Case

$$\frac{\delta S}{S} = \mu(\delta t) + \sigma \epsilon \sqrt{\delta t}$$

$$\frac{\delta S}{S} = e^{\mu(\delta t) + \sigma \epsilon \sqrt{\delta t}}$$

GEOMETRIC BROWNIAN MOTION
EXPONENTIAL BROWNIAN MOTION



NOTE: A BROWNIAN MOTION IS AN ACCEPTED METHODOLOGY IN FORECASTING STOCK PRICES AND VALUING DERIVATIVES, AND IS A REQUIRED ASSUMPTION IN VALUING REAL OPTIONS.

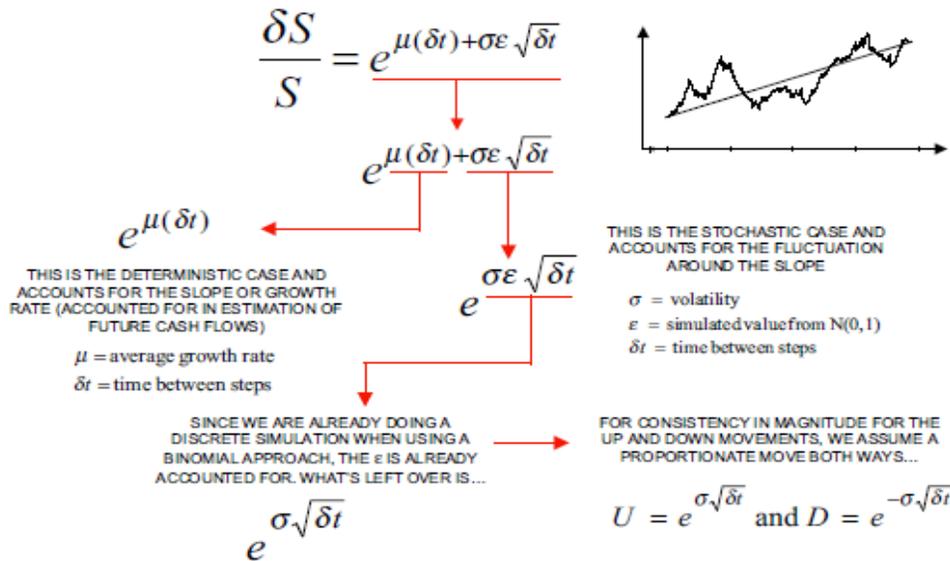


FIGURE 6.17 Up and Down Lattice Equations

Otras opciones reales

- **Opción de contraer**

La opción de contraer toma un valor significativo en el contexto competitivo actual, donde las empresas deben reducir su operación dependiendo de las condiciones de cambio del mercado. En este caso la opción se caracteriza como una opción put, ya que su valor se incrementa cuando el valor del activo cae.

$$\text{Opcion de contraer} = \text{Max}(\text{contrar}, \text{opcion de mantener})$$

- **Opción arcoíris**

Como se ha mencionado a lo largo de este documento, la volatilidad es un factor clave en la estimación del valor de una opción real, generalmente esta variable se calcula de forma agregada donde muchas variables contribuyen a la incertidumbre. Existe otra alternativa y es estimar de forma desagregada la fuente de volatilidad, un ejemplo es en la producción de un campo petrolero, donde se tienen dos grandes fuentes de incertidumbre, una es el comportamiento de los precios del petróleo y la cantidad de reservas que existen en un campo; en este caso si se consideran sus volatilidades de forma separada, esta sería una opción arcoíris. El método para solucionar esta clase de opciones es básicamente el mismo que con un único factor de volatilidad, con la diferencia que implica construir un árbol cuatrinomial a cambio de uno binomial, esto se debe a que el activo puede tomar uno de los 4 posibles valores, según se vaya moviendo en los nodos del árbol. $((S_0 u \text{ reservas}, S_0 u \text{ Oil price}); (S_0 d \text{ reservas}, S_0 d \text{ Oil price}); ((S_0 d \text{ reservas}, S_0 u \text{ Oil price}); ((S_0 u \text{ reservas}, S_0 d \text{ Oil price})).$

- **Opciones con cambios en el strike Price**

En los proyectos es normal que con el paso del tiempo el monto asociado a la inversión cambie en el tiempo, cuando esto ocurre es necesario hacer una opción con cambios en el strike Price o precio de ejercicio en el tiempo, este análisis se puede aplicar a cualquiera de las opciones que se mencionaron con anterioridad, en el cual se asigna el costo correspondiente a cada periodo de tiempo y se calcula el árbol binomial normalmente, dependiendo si la opción es de expandir, contraer o abandonar.

- **Opciones con cambios de volatilidad**

En el análisis de opciones reales se asume que la volatilidad de los proyectos es relativamente constante durante la vida de la opción, por lo cual se usa un solo factor agregado de volatilidad en el árbol binomial. Pero si se espera que la volatilidad cambie durante la vida de la opción, esto se puede considerar cambiando el árbol binomial que ya no se recombinaría. Para esto se inicia con el primer factor de volatilidad y se construye el

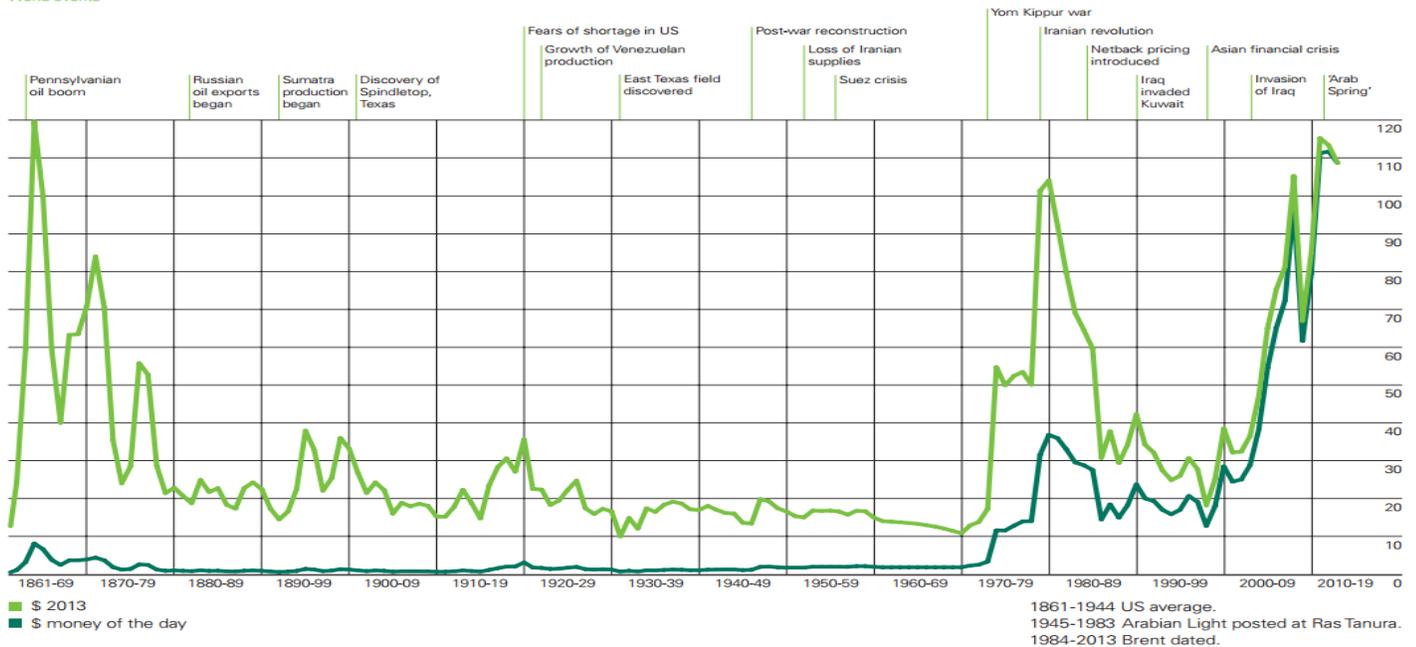
árbol binomial con los factores de alza y caída hasta el punto en el que la volatilidad cambia, para después calcular los siguientes nodos con la nueva volatilidad.

Análisis de los precios del petróleo

Desde el 2014 la industria petrolera se encuentra en un ciclo de precios bajos y estabilización, que fue generado uno por el aumento de producción de petróleo, en especial de Estados Unidos que ha implementado masivamente la tecnología de Fracking, que le ha permitido explotar yacimientos no convencionales y ser autosuficiente, además ha aumentado los niveles de inventarios de este recurso; dos por la desaceleración económica de los países en vía de desarrollo China, Brasil, Rusia e India, que han reducido el crecimiento en la demanda de este recursos. A corto plazo no se tienen señales que permitan concluir que esta tendencia de precios vaya a cambiar, ya que los intentos de la OPEP y de Rusia por subir los precios al recortar la producción, han sido neutralizados por una mayor oferta del recurso proveniente de Estados Unidos.

Ilustración 21 Comportamiento histórico de los precios del petróleo

Crude oil prices 1861-2013
US dollars per barrel
World events



(BP, 2014)

