



Universidad Nacional Autónoma de México

---

Facultad de Ingeniería

*“Teoría de las opciones reales: el valor de la flexibilidad en la evaluación de proyectos en la industria petrolera”*

*Tesis*

*Para obtener el título:*

*Ingeniero Petrolero*

*Presenta:*

*Fernando Núñez Méndez*

*Director de Tesis:*

*M. en C. Ulises Neri Flores*



*Ciudad Universitaria*

*Mayo 2011*

## **I Resumen**

## **II Introducción**

### **Capítulo 1. Conceptos técnicos de ingeniería petrolera**

#### 1.1 Conceptos básicos y clasificación de las reservas

- 1.1.1 Volumen original de hidrocarburos total
- 1.1.2 Volumen original de hidrocarburos no descubierto
- 1.1.3 Volumen original de hidrocarburos descubierto
- 1.1.4 Recursos prospectivos
- 1.1.6 Recursos contingente.
- 1.1.6 Reservas
  - 1.1.6.1 Reservas probadas
  - 1.1.6.2 Reservas desarrolladas
  - 1.1.6.3 Reservas no desarrolladas
  - 1.1.6.4 Reservas no probadas
  - 1.1.6.5 Reservas probables
  - 1.1.6.6 Reservas posibles
  - 1.1.6.7 Reservas técnicas

#### 1.2 Pronósticos de producción

- 1.2.1 Métodos Volumétricos
  - 1.2.1.1 Ejemplo de cálculo
- 1.2.2 Método de Balance de Materia
  - 1.2.2.1 Conceptos y ecuaciones fundamentales empleadas por el método de Balance de Materia
  - 1.2.2.2 Yacimientos de aceite bajo saturado
  - 1.2.2.3 Ecuación general de balance de materia para yacimientos de aceite saturado
  - 1.2.2.4 Yacimientos de gas
  - 1.2.2.5 Ventajas y desventajas
  - 1.2.2.6 Ejemplo de cálculo
- 1.2.3 Método de Curvas de Declinación.
  - 1.2.3.1 Tipos de declinación a partir de la expresión general
  - 1.2.3.2 Ventajas y desventajas
- 1.2.4 Método de Simulación Matemática.
  - 1.2.4.1 Ventajas y desventajas

### **Capítulo 2. Evaluación económica de proyectos**

#### 2.1 Conceptos técnicos de economía

- 2.1.1 Variables económicas
  - 2.1.1.1 Precio de los hidrocarburos
  - 2.1.1.2 Producción
  - 2.1.1.3 Costos
  - 2.1.1.4 Inversiones en los proyectos
  - 2.1.1.5 Tiempo
- 2.1.2 Indicadores económicos.
  - 2.1.2.1 Valor presente neto.
  - 2.1.2.2 Tasa interna de retorno.
  - 2.1.2.3 Relación Costo Beneficio (C/B)
  - 2.1.2.4 Limite económico (LE).

## 2.2 Conceptos de probabilidad

2.2.1 Distribuciones de probabilidad.

2.2.2 Estadística

2.2.2.1 Medidas de tendencia central

2.2.3 Teorema de Bayes

2.2.4 Valor de la información

2.2.5 Distribuciones de probabilidad

2.2.5.1 Distribuciones de probabilidad de variables discretas y de variables continuas

2.2.5.2 Distribuciones de probabilidad para variables discretas

2.2.5.3 Distribuciones de probabilidad para variables continuas

## 2.3 Metodologías para la evaluación de proyectos

2.3.1 Unidad de inversion

2.3.2 Tipos de unidades de inversion

2.3.3. Estudio de mercado de hidrocarburos

2.3.4 Estudio técnico

2.3.5 Análisis económico financiero

2.3.6 Evaluación económica

2.3.6.1 Análisis de flujos Descontados

2.3.6.2 Evaluación probabilística

# Capítulo 3. Teoría de las opciones reales

## 3.1 Opciones Financieras y opciones reales

3.1.1 Opciones Financieras

3.1.2 Opciones Reales

3.1.3. Opciones reales vs opciones financieras

## 3.2. Tipos de opciones reales

3.2.1 Opción de crecimiento-decrecimiento

3.2.2 Opción de espera

3.2.3 Opción de abandono

## 3.3 Métodos de Evaluación

3.3.1 Modelo Binomial

3.3.1.1 Reticulado del activo subyacente

3.3.1.2 Reticulado de valoración

3.3.2 Modelo de Black-Sholes

## 3.4 Evaluación de los tipos de opciones reales

3.4.1 Métodos determinísticos

3.4.2 Opción de crecimiento

3.4.3 Opción de espera

3.4.4 Opción de abandono

## **Capítulo 4. Aplicaciones de la teoría de las opciones reales**

- 4.1 ¿Cuándo usar las Opciones Reales?
- 4.2 Como las compañías petroleras pueden utilizar las Opciones Reales
  - 4.2.1 Caso 1
  - 4.2.2 Caso 2
  - 4.2.3 Caso 3
- 4.3 Los pasos para la evaluación de un proyecto mediante opciones reales
  - 4.3.1 Estructurar la aplicación
  - 4.3.2 Implantar el modelo de valoración
  - 4.3.3 Examinar los resultados
  - 4.3.4 Rediseñar si es necesario
- 4.4 Ejemplos
  - 4.4.1 La opción de diferir una decisión
  - 4.4.2 La opción de cambio. Dimensionamiento de instalaciones para el campo Tsimin
    - 4.4.2.1 Descripción del campo
    - 4.4.2.2 Desarrollo del campo
    - 4.4.2.3 Reservas
    - 4.4.2.4 Descripción del escenario de explotación del campo
    - 4.4.2.5 Pronósticos de producción
    - 4.4.2.6 Variación de Reservas de hidrocarburos
    - 4.4.2.7 Problemática a evaluar
    - 4.4.2.8 Evaluación
    - 4.4.2.9 Análisis de resultados
- 4.5 Problemática de aplicación de las opciones reales
  - 4.5.1 La varianza
  - 4.5.2 El ejercicio no es instantáneo
  - 4.5.3 El precio
  - 4.5.4 El proyecto carece de flexibilidad
- 4.6 La gestión de las opciones reales: una mentalidad enfocada a su aplicación
  - 4.6.1 El valor de la flexibilidad
  - 4.6.2 El papel de la empresa en el valor de sus opciones

### **Conclusiones**

### **Recomendaciones**

### **Bibliografía**

## Índice de figuras

- Figura 1 *Clasificación de los recursos y reservas de hidrocarburos. (PEMEX 2010)*
- Figura 2 *Clasificación de las reservas de hidrocarburos.*
- Figura 3 *Evaluación de proyectos (Glinz, 2007)*
- Figura 4 *Prospecto de pozo a perforar*
- Figura 5 *Prospecto de pozo considerando la adquisición de información*
- Figura 6 *Gráfica de la distribución normal de probabilidad o campana de Gauss*
- Figura 7 *Unidades de inversión (GASTELUM 2007)*
- Figura 8 *Árbol de decisión*
- Figura 9 *Distribución de probabilidad para la porosidad*
- Figura 10 *Modelo binomial*
- Figura 11 *Reticulado del activo subyacente de 3 periodos*
- Figura 12 *posibles valores del activo*
- Figura 13 *Posibles valores de la opción*
- Figura 14 *Reticulado expandido de 5 periodos*
- Figura 15 *Ejemplo del reticulado expandido de 5 periodos*
- Figura 16 *Construcción del reticulado de valoración (BAILEY, 2004)*
- Figura 17 *Método binomial de valoración de opciones*
- Figura 18 *Opción de espera*
- Figura 19 *Opción de abandono*
- Figura 20 *Árbol binomial del ejemplo 1*
- Figura 21 *Valor de la opción de crecimiento*
- Figura 22 *Plano de ubicación del campo Tsimin (PEMEX, 2011)*
- Figura 23 *Áreas 1P, 2P y 3P originales, para el yacimiento JSK a partir del pozo Tsimin-1 (PEMEX, 2011)*
- Figura 24 *Comportamiento de producción de aceite y gas (PEMEX 2011)*
- Figura 25 *Reticulado del activo subyacente: escenario base*
- Figura 26 *Reticulado de valoración ejemplo 2*

## **RESUMEN**

La presente tesis busca profundizar en la aplicación de la teoría de las opciones reales, como una herramienta en la toma de decisiones en la industria del petróleo y del gas. Dicha teoría, aun no ha sido tomada en cuenta como un valioso instrumento en la evaluación de proyectos.

La valoración mediante opciones reales, ofrece una herramienta cuando una empresa debe afrontar decisiones que brindan oportunidades a futuro. Esta valoración no se encuentra limitada respecto a la flexibilidad a lo largo del tiempo, ya que considera que el proyecto es dinámico, y que su evolución puede ser alterada por los participantes en él; además, toma en cuenta que cada proyecto tiene derivaciones que pueden adquirir valor; es decir, existen las oportunidades de crecer, de esperar o de vender un activo del proyecto, tal como ocurre en el mundo real.

En la presente tesis se abordan las principales analogías de la teoría financiera para las opciones reales, todo enfocado a la industria petrolera, se desarrollan las principales fórmulas, citando situaciones en nuestra industria en las que se puede aplicar. Se ilustra mediante un par de ejemplos, el valor de la flexibilidad en la toma de decisiones y se termina mediante un análisis de la problemática que tiene esta metodología al aplicarla.

## **INTRODUCCIÓN**

En la industria petrolera abundan las incertidumbres y los riesgos; es por ello fundamental para el éxito de la empresa conocer y aprovechar tanto las metodologías como las herramientas que permitan tomar las decisiones óptimas a lo largo de la vida de un proyecto.

En la presente tesis se busca profundizar la aplicación de la teoría de las opciones reales, como una herramienta en la toma de decisiones en la industria del petróleo y del gas, ya que aunque no es una herramienta nueva, hasta el momento no ha sido aprovechada en la evaluación de proyectos de nuestra industria petrolera.

Antes de entrar de lleno al tema, es importante concientizar a los responsables de la toma de decisiones en los proyectos de ésta industria, sobre la necesidad de utilizar herramientas de evaluación al máximo de su potencial, con el fin de optimizar los portafolios de exploración y producción.

Ninguna industria cuenta con recursos “de sobra”; la optimización de estos recursos representa una ventaja competitiva que no puede ser ignorada por ninguna empresa, si bien existen estrategias, metodologías y herramientas para lograr esta ventaja, no se les aprovecha al máximo. Se basa más en la intuición de los profesionales encargados, en dar continuidad al plan corporativo, y en la experiencia al momento de evaluar las opciones.

Mientras la práctica más común de las empresas es utilizar el análisis de flujos descontado, en el que se calcula el valor presente neto de cada proyecto, a una determinada tasa de descuento y posteriormente se ordenan de mayor a menor valor los proyectos. Esta técnica se ve limitada por su insensibilidad a circunstancias cambiantes; es decir, no toma en cuenta ni el riesgo ni la incertidumbre, grave error, considerando los constantes cambios en la industria petrolera.

Entre los principales problemas en la toma de decisiones que enfrenta la industria, se encuentran:

- Los parámetros clave en la toma de decisiones de la industria petrolera, se encuentran sujetos a incertidumbre, por tanto, no pueden ser tomadas de manera estática.

- Los proyectos de alto riesgo fracasan del orden de cuatro veces más de lo previsto, porque se subestima el riesgo.
- Los costos reales de los proyectos a menudo exceden los costos previstos entre el 20% y el 100%
- Las proyecciones económicas, así como los patrones utilizados para medir y estimar los proyectos no son recalibrados ni se van ajustando conforme pasa el tiempo, en función de los resultados que se van obteniendo.

Es por ello que esta tesis busca que la toma de decisiones, no sólo dependa de la subjetividad de la o las personas responsables de tomar las mismas, o de la influencia de prejuicios y predisposiciones, sino que se contemple un enfoque afrontando la necesidad de expresar y resolver las estimaciones mediante rangos probabilísticos y no solo valores al azar, es decir utilizar las herramientas disponibles para la mejor toma de decisiones.

Las herramientas para enfrentar estos problemas existen; en esta tesis se da una breve introducción de las principales metodologías; sin embargo, ya que el propósito principal es la valoración mediante las opciones reales, será este tema en el que se profundizará. Esta tesis busca ser un apoyo para los profesionales encargados del análisis de portafolios de proyectos de la industria que deseen aplicar esta técnica.

La valoración mediante opciones reales, ofrece una forma de pensar, para que cuando la empresa afronte decisiones que brinden oportunidades a futuro, no se encuentre limitada respecto a la flexibilidad a lo largo del tiempo. Este tipo de valoración considera que el proyecto no es estático, considera que la evolución de un proyecto puede ser alterada por los participantes en el mismo; además, toma en cuenta que cada proyecto tiene derivaciones que pueden adquirir valor; es decir, existen las oportunidades de crecer, de esperar y ver o de vender un activo del proyecto.

Las opciones reales reflejan la variabilidad y la incertidumbre que caracterizan al mundo actual y permiten descubrir valores adicionales en los proyectos, que pudieran estar ocultos mediante la evaluación de técnicas estáticas.

Las opciones reales surgen de una analogía con las opciones financieras, buscando proveer una medida del valor de la flexibilidad en las decisiones empresariales; en esta tesis se establece dicha analogía definiendo las similitudes y diferencias respecto a las opciones financieras.

Como punto de partida para abordar la evaluación de los proyectos, se presenta una base de conceptos fundamentales que involucran la administración de portafolios de exploración y producción, como son: conceptos de yacimientos, de reservas y de probabilidad. Para posteriormente conocer las técnicas antes mencionadas y así tener la retroalimentación suficiente para aprovechar más la principal técnica de la que trata esta tesis.

En la última parte, para poder evaluar y validar la técnica, se utilizan ejemplos prácticos resueltos mediante dicha metodología, se comparan los resultados, con los obtenidos mediante metodologías estáticas; con esto se pueden enunciar las principales ventajas y desventajas de la misma.

# **CAPÍTULO 1. Conceptos técnicos de ingeniería petrolera**

Se inicia la presente tesis realizando una recapitulación de algunos conceptos fundamentales para la ingeniería petrolera, con el fin de contar con las bases sólidas suficientes, pues sin ellas ninguna compañía ni profesionista podrán alcanzar los objetivos deseados.

## **1.1 Conceptos básicos y clasificación de reservas**

Para cualquier compañía de exploración y producción, las reservas respaldan su valor ante los inversionistas y socios; cuando una empresa posee reservas es una empresa capaz de generar ganancias, y gracias a esto podrá tener el acceso a créditos y financiamientos para la realización de sus proyectos. Las reservas son el respaldo de cualquier compañía petrolera para recibir el presupuesto para la realización de un proyecto. En este primer capítulo, se abordan los conceptos indispensables para poder realizar una adecuada evaluación de proyectos en la industria petrolera.

En esta industria los proyectos son validados a través de la determinación y cuantificación de las reservas. Para cumplir esta función, existen distintas organizaciones gremiales y de seguridad como son: la Securities and Exchange Comisión (SEC), entidad encargada de regular los mercados de valores y financieros de los Estados Unidos de Norteamérica, la Society of Petroleum Engineers (SPE), el World Petroleum Council (WPC) y la asociación de profesionales American Association of Petroleum Geologists (AAPG); éstas se dieron a la tarea de sentar las bases y los lineamientos para llevar a cabo una clasificación estándar que permitiera realizar comparaciones entre éstas y que fuera aplicable a nivel mundial. El resultado obtenido fue una clasificación que ubica a las reservas de acuerdo al nivel de incertidumbre y riesgo tanto técnico como económico que representa su recuperación. Nuestro objetivo, en este capítulo es conocer esta clasificación de reservas, así como la forma de calcular su volumen.

Comenzaremos con el siguiente cuadro, e iremos explicando las partes que lo conforman:

Volumen original de hidrocarburos total						
Volumen original de hidrocarburos no descubierto		Volumen original de hidrocarburos descubierto				
		No económico		Económico		
Rango de incertidumbre	Pr	Estimación baja	Co	Estimación baja	Probada	P r o d u c i ó n
	Res	Estimación central	Re	Estimación central	Probada + probable	
	sv	Estimación alta	Res	Estimación alta	Probada + probable + posible	
	No recuperable	No recuperable				

Figura 1:

Clasificación de los recursos y reservas de hidrocarburos. (PEMEX 2010)

### 1.1.1 Volumen original de hidrocarburos total

Es la cuantificación de todas las acumulaciones de hidrocarburos naturales que se estima existen en una determinada región. Esto incluye a las acumulaciones conocidas, económicas o no, recuperables o no, a la producción obtenida de los campos explotados o en explotación, y también las cantidades estimadas en los yacimientos que podrían ser descubiertos.

El volumen original de hidrocarburos total son recursos potencialmente recuperables, ya que la estimación de la parte que se espera recuperar depende de la incertidumbre asociada, y también de circunstancias comerciales, desarrollos tecnológicos y disponibilidad de datos. Por consiguiente, una porción de aquellas cantidades clasificadas como no recuperables en un momento dado pueden transformarse, en el futuro, en recursos recuperables si por ejemplo, las condiciones comerciales cambian, o si nuevos desarrollos tecnológicos ocurren, o si datos adicionales son adquiridos.

### **1.1.2 Volumen original de hidrocarburos no descubierto**

Es la cantidad de hidrocarburos evaluada, a una fecha dada, de acumulaciones que todavía no se descubren pero que han sido inferidas. Al estimado de la porción potencialmente recuperable del volumen original de hidrocarburos no descubierto se le define como recurso prospectivo.

### **1.1.3 Volumen original de hidrocarburos descubierto**

Es la cantidad estimada de hidrocarburos, a una fecha dada, alojada en acumulaciones conocidas más la producción de hidrocarburos obtenida de las mismas. Una acumulación es económica cuando hay generación de valor como consecuencia de la explotación de sus hidrocarburos. Asimismo, la parte que es recuperable, se clasifica en recurso contingente si no es reserva y en reserva si es económica

### **1.1.4 Recursos prospectivos**

Es la cantidad de hidrocarburos estimada, a una fecha dada, de acumulaciones que todavía no se descubren pero que han sido inferidas, y que se estiman potencialmente recuperables. Esta cuantificación está basada en información geológica y geofísica del área en estudio y en analogías con las áreas de volumen original de hidrocarburos descubiertos.

### **1.1.5 Recursos contingentes**

Son aquellas cantidades de hidrocarburos que son estimadas, a una fecha dada, que potencialmente son recuperables de acumulaciones conocidas pero que, bajo las condiciones económicas de evaluación a esa fecha, no son comercialmente recuperables. La recuperación de los recursos contingentes depende del desarrollo de nuevas tecnologías, de la disminución en los costos o del incremento del precio de los hidrocarburos.

### 1.1.6 Reservas

A continuación abordaremos lo referente a reservas de hidrocarburos, por medio de la figura 2 explicaremos sus componentes.

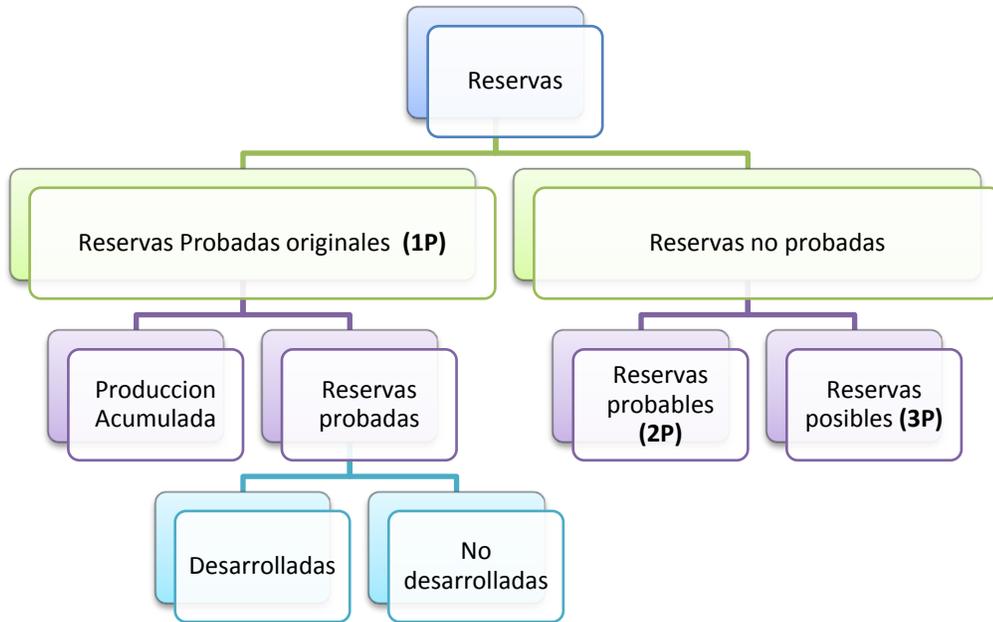


Figura 2: Clasificación de las reservas de hidrocarburos

#### 1.1.6.1 Reservas probadas

Son volúmenes de hidrocarburos evaluados a condiciones atmosféricas y bajo condiciones económicas actuales, que se estima serán comercialmente recuperables en una fecha específica, con una certidumbre razonable, cuya extracción cumple con las normas gubernamentales establecidas, y que han sido identificados por medio del análisis de información geológica y de ingeniería. Las reservas probadas se pueden clasificar como desarrolladas o no desarrolladas.

El establecimiento de las condiciones económicas actuales incluye la consideración de los precios, los costos de extracción, y los costos históricos en un periodo consistente con el proyecto. Además, si en la evaluación se utiliza un método determinista; es decir, sin una

connotación probabilista, el término de certidumbre razonable se refiere a que existe una confiabilidad alta de que los volúmenes de hidrocarburos sean recuperados. Por el contrario, si se emplea un método probabilista, entonces la probabilidad de recuperación de la cantidad estimada deberá ser de 90 por ciento o más.

#### **1.1.6.2 Reservas desarrolladas**

Son aquellas reservas que se espera sean recuperadas de pozos existentes, que pueden ser extraídas con la infraestructura actual mediante actividades adicionales con costos moderados de inversión. En el caso de las reservas asociadas a procesos de recuperación secundaria y/o mejorada, serán consideradas desarrolladas únicamente cuando la infraestructura requerida para el proceso este instalada o cuando los costos requeridos para ello, sean considerablemente menores.

#### **1.1.6.3 Reservas no desarrolladas**

Son reservas que se espera serán recuperadas a través de pozos nuevos en áreas no perforadas, o donde se requiere un gasto relativamente alto para terminar los pozos existentes y/o construir las instalaciones de producción y transporte. Lo anterior implica tanto procesos de recuperación primaria como recuperación secundaria y mejorada.

#### **1.1.6.4 Reservas no probadas**

Son volúmenes de hidrocarburos evaluados a condiciones atmosféricas, al extrapolar características y parámetros del yacimiento más allá de los límites de razonable certidumbre, o de suponer pronósticos de aceite y gas con escenarios tanto técnicos como económicos que no son los que prevalecen al momento de la evaluación.

#### **1.1.6.5 Reservas probables**

Son aquellas reservas en donde el análisis de la información geológica y de ingeniería de estos yacimientos sugiere que son más factibles de ser comercialmente recuperables, que de no serlo. Si se emplean métodos probabilistas para su evaluación, existirá una probabilidad de al menos

50 por ciento de que las cantidades a recuperar sean iguales o mayores que la suma de las reservas probadas más probables.

Las reservas probables incluyen aquellas reservas más allá del volumen probado, y donde el conocimiento del horizonte productor es insuficiente para clasificar estas reservas como probadas.

En cuanto a los procesos de recuperación secundaria y/o mejorada, las reservas atribuibles a estos procesos son probables cuando un proyecto o prueba piloto ha sido planeado, pero aun no se encuentra en operación, y cuando las características del yacimiento parecen favorables para una aplicación comercial.

#### **1.1.6.6 Reservas posibles**

Son aquellos volúmenes de hidrocarburos cuya información geológica y de ingeniería sugiere que es menos segura su recuperación comercial que las reservas probables. De acuerdo con esta definición, cuando son utilizados métodos probabilistas, la suma de las reservas probadas, probables más posibles tendrá al menos una probabilidad de 10 por ciento de que las cantidades realmente recuperadas sean iguales o mayores.

En general, las reservas posibles pueden incluir los siguientes casos:

- Reservas que están basadas en interpretaciones geológicas y que pueden existir en áreas adyacentes a las áreas clasificadas como probables en el mismo yacimiento.
- Reservas en formaciones que parecen estar impregnadas de hidrocarburos, basados en análisis de núcleos y registros de pozos, pero pueden no ser comercialmente productivas.
- Reservas adicionales por perforación intermedia que está sujeta a incertidumbre técnica.
- Reservas incrementales atribuidas a mecanismos de recuperación mejorada cuando un proyecto o prueba piloto está planeado, pero no en operación, y las características de

roca y fluido del yacimiento son tales, que una duda razonable existe de que el proyecto será comercial.

Es importante destacar que los datos de las reservas de hidrocarburos no son fijos, sino que tienen un carácter dinámico debido a un ajuste continuo, a medida que se cuenta con mayor y mejor información.

#### **1.1.6.7 Reservas técnicas**

- Reserva 1P: Es la reserva probada
- Reserva 2P: Es la suma de las reservas probadas más las reservas probables
- Reserva 3P: Es la suma de las reservas probadas más las reservas probables más las reservas posibles

### **1.2 Pronósticos de producción**

Los pronósticos de producción son estimaciones de lo que se espera obtener de los yacimientos; estos pronósticos se basan en el esquema de explotación (tecnología empleada), propiedades petrofísicas del propio yacimiento y las propiedades de los fluidos. Los utilizamos para identificar matemáticamente una tendencia del comportamiento de la presión o de la producción.

Los pronósticos nos permiten cuantificar los volúmenes originales de hidrocarburos, producciones esperadas y volúmenes remanentes.

Existen dos principales tipos de métodos: los determinísticos y los probabilísticos. Dentro de los determinísticos, la mayoría son los de tipo volumétrico: balance de materia, curvas de declinación y simulación numérica; mientras que los probabilísticos modelan la incertidumbre de parámetros como porosidad, saturación de agua, espesores netos, como funciones de probabilidad que producen, en consecuencia, una función de probabilidad para el volumen original. Para el caso de los métodos probabilísticos, profundizaremos en el capítulo 2 de la presente tesis, en la sección de Simulación de Montecarlo.

### 1.2.1 Métodos volumétricos

Serán aplicados solamente cuando los datos geológicos sean suficientes, ya que su base teórica es la estimación de propiedades tanto de la roca como de los fluidos, entre las principales podemos mencionar: porosidad ( $\Phi$ ), permeabilidad ( $k$ ), saturación de fluido, ( $S_o$ ,  $S_w$ ,  $S_g$ ), así como la geometría del yacimiento, su área y espesor neto.

El cálculo del volumen original ( $N$ ), será obtenido mediante el volumen de roca, la porosidad, la saturación de aceite inicial y el factor de volumen del hidrocarburo mediante la fórmula:

donde:

$N$  = volumen original de aceite @ condiciones std, en [bl]

$A$  = área del yacimiento [ $m^2$ ]

$h$  = espesor promedio [ $m$ ] (intervalo productor)

$\phi$  = porosidad promedio [fracción]

$S_{oi}$  = saturación de aceite inicial [fracción]

$B_{oi}$  = factor de volumen del aceite @ condiciones iniciales [bl/bl]

El volumen bruto de la roca se determina a partir de un mapa de isopacas del yacimiento; los valores promedio de la porosidad y saturación de aceite, a partir de datos de registros de pozos y de análisis de núcleos y, el factor de volumen del aceite, de análisis *PVT* o por medio de correlaciones.

Además por medio de este método es posible también calcular o estimar las reservas de hidrocarburos, al multiplicar el volumen original de hidrocarburos por un factor de recuperación, el cual es estimado a partir de las propiedades petrofísicas del sistema roca fluidos y de las propiedades de los fluidos.

La recuperación final ( $R_f$ ):

donde:

$R_f$  = recuperación final o reserva total

$N$  = volumen original

FR = Factor de Recuperación

El volumen del gas disuelto en el aceite original, está dado por:

donde:

$G_s$  = gas en solución original [ *pies*<sup>3</sup> ]

$R_{si}$  = relación gas-aceite inicial [ *pies*<sup>3</sup> / *bl* ]

$N$  = volumen original

Si el yacimiento tiene casquete de gas, éste está dado por:

\_\_\_\_\_

Donde:

$G$  = gas libre original [ *pies*<sup>3</sup> ]

$S_{gi}$  = saturación de gas inicial [fracción]

$B_{gi}$  = factor de volumen del gas inicial [ *bl* / *pies*<sup>3</sup> ]

$h$  = espesor promedio [ *pies* ]

$A$  = area del yacimiento [fracción]

$\Phi$  = porosidad promedio [ *pies* ]

### 1.2.1.1 Ejemplo de cálculo

Calcular el volumen original de aceite, así como el pronóstico de producción, de un yacimiento bajo-saturado, con empuje de agua. Después de los estudios sísmicos, así como la perforación de algunos pozos delimitadores y exploratorios, se determinó que el área del yacimiento es de 6.79 km<sup>2</sup>, el espesor promedio de la formación es de 58m, adicionalmente los estudios de laboratorio, así como los estudios geofísicos nos indican los siguientes datos adicionales: factor inicial de volumen (Boi) = 1.2, Porosidad ( $\Phi$ ) = 8%, Saturación inicial de agua (Swi) = 19%. Además considerando exclusivamente la recuperación primaria se estima un factor de recuperación (FR) del 23%

Datos:

- área (A) = 6.79 km<sup>2</sup> = 67900000m<sup>2</sup>
- espesor promedio de la formación (h) = 58m
- Boi = 1.2 [bl/bl]
- $\Phi$  = 8% = 0.08
- Swi = 19% = 0.19; Soi = 1-Swi = 1-0.19= 0.81
- FR = 23% = 0.23

a) Volumen original de aceite (N)

\_\_\_\_\_

b) Pronóstico de producción (Np)

### **1.2.2 Método de Balance de Materia**

Se basa en el principio de conservación de la masa, es decir; considera solo la transformación de esta, existiendo siempre un balance en el que no existen pérdidas, la masa que entra es igual a la masa que sale, de forma similar, masa que se expande es igual a la masa que se produce. Utiliza el volumen de control para cuantificar los cambios existentes en el mismo.

La Ecuación de Balance de Materia (EBM), expresa la relación que debe existir durante todo el tiempo en un yacimiento, que se produce en condiciones que se aproximen al estado de equilibrio. En el caso de yacimientos de aceite negro, de gas seco o gas húmedo, en los que la composición y la densidad no cambian notablemente al disminuir la presión, el balance puede realizarse en base a sus volúmenes como lo veremos más adelante en el presente capítulo.

Para la aplicación de la EBM se deben hacer ciertas consideraciones dentro de las que destacan:

- El yacimiento es una unidad completa, homogénea e isotrópica.
- El aceite y el gas se comportan en el yacimiento en forma similar a como lo hicieron en el laboratorio durante el análisis PVT.
- El campo ha sido desarrollado.
- El volumen es constante en los yacimientos de gas y en los de aceite saturado.
- Existe un equilibrio en la presión en todo el yacimiento y durante todo el tiempo de la explotación. Esto implica que en el yacimiento no existan presiones diferenciales de gran magnitud y que no ocurra cambio en la composición del fluido, excepto el indicado en los análisis PVT.
- No ocurre el mecanismo de empuje por segregación gravitacional del gas y no se produce gas del casquete. Estas suposiciones son necesarias únicamente para la deducción.

### 1.2.2.1 Conceptos y ecuaciones fundamentales empleadas por el método de balance de materia

- **Relación de solubilidad (Rs):** es el volumen de gas disuelto en el aceite a las condiciones de presión y temperatura en el yacimiento, el cual se libera cuando el volumen de aceite pasa de las condiciones dichas condiciones a las condiciones estándar:

\_\_\_\_\_

- **Factor de volumen del aceite (Bo):** Se define como el volumen que ocupa en el yacimiento, con su gas disuelto un metro cubico de aceite muerto en la superficie:

\_\_\_\_\_

- **Factor de volumen del gas (Bg):** Es el volumen que ocupa en el yacimiento un metro cubico de gas medido en la superficie a condiciones estándar:

\_\_\_\_\_

- **Factor de volumen total (Bt):** El factor de volumen de la fase mixta se define como el volumen de aceite más su gas disuelto más el volumen de gas libre medidos a condiciones de presión y temperatura del yacimiento entre el volumen de aceite muerto medido a condiciones estándar:

- **Saturación del fluido (Sf):** La saturación  $S$  de un fluido  $f$  en un medio poroso, se define como el volumen del fluido  $V_f$  medido a la presión y temperatura a que se encuentre el medio poroso, entre su volumen de poros  $V_p$ :

—

- **Porosidad ( $\phi$ ):** Se define como el volumen de poros de la roca  $V_p$  entre el volumen total de la roca  $V_r$ :

—

- **Compresibilidad del aceite ( $C_o$ ):** La compresibilidad es una medida del cambio del volumen del fluido respecto al cambio de presión. Donde la compresibilidad del aceite se define como la variación en el volumen del aceite con respecto a la presión:

—————

- **Compresibilidad total ( $C_t$ ):** La compresibilidad total se refiere a la variación que presenta el volumen del sistema roca-fluidos respecto al cambio de presión:

—————

donde:

$C_o$  = compresibilidad del aceite

$C_w$  = compresibilidad del agua

$C_f$  = compresibilidad de la formación

$S_o$  = saturación de aceite

$S_w$  = saturación de agua

- **Saturación de aceite ( $S_o$ ):** Se define como el volumen de aceite contenido en el medio poroso. En este caso se encuentra representado como fracción:

donde  $S_w$  = Saturación de agua

- **Saturación de gas ( $S_g$ ):** Se define como el volumen de gas contenido en el medio poroso. En este caso se encuentra representado como fracción:

### 1.2.2.2 Yacimientos de aceite bajo saturado

Las ecuaciones generales de balance de materia para yacimientos de aceite, contienen tres incógnitas: aceite original in-situ, ( $N_{Boi}$ ), tamaño del casquete gaseoso ( $GB_{gi}$ ), y la entrada de agua acumulada, ( $We$ ).

Las ecuaciones incluyen datos de producción e inyección y propiedades de la roca y de los fluidos que dependen de la presión del yacimiento. Todas las incógnitas deberán ser ajustadas durante el ajuste de la presión. Para el ajuste de la historia se requieren los siguientes datos:

- Producción acumulada ( $N_p$ ,  $W_p$  y  $G_p$ ).
- Datos  $PVT$  de los fluidos del yacimiento en los rangos de presión esperados.

La ecuación para yacimientos bajo-saturados con entrada de agua es la siguiente:

Donde:

entrada de agua

agua producida

factor de volumen del agua

El factor de recuperación (FR) y el volumen remanente (VR) están dados por las siguientes expresiones:

—

### 1.2.2.3 Ecuación general de balance de materia para yacimientos de aceite saturado

Cuando la presión del yacimiento es igual a la presión de burbuja, el aceite ya no es capaz de mantener disuelto al gas y éste comienza a ser liberado. El gas disuelto liberado si no es producido puede formar una fase continua o casquete, que será también un mecanismo de empuje. También existen yacimientos con un casquete de gas ya existente antes de su explotación, el cual, al presentarse un abatimiento de la presión se expande, al igual que el sistema roca-fluidos, desplazando al aceite hacia los pozos productores. Este es el principio para la obtención de la ecuación para yacimientos saturados, al igual que para los yacimientos bajo saturados.

Por lo tanto la ecuación de balance de materia para yacimientos saturados con un acuífero asociado es la siguiente:

$$I^- \quad \Delta \quad + \quad I^- \quad + \quad I^- \quad \Delta$$

### 1.2.2.4 Yacimientos de gas

Las ecuaciones generales de balance de materia para yacimientos de gas, contienen dos incógnitas: volumen de gas in-situ,  $G$ , y entrada de agua acumulada,  $Wp$ .

Además, la ecuación considera los siguientes ajustes:

- Producción de gas, producciones de condensado y agua del yacimiento
- Presión promedio del yacimiento correspondiente a cada punto
- Datos de los fluidos del yacimiento (datos  $PVT$ ) en función de la presión.

La ecuación para yacimientos de gas con entrada de agua es la siguiente:

$$\text{—————} \quad \text{—————} \quad \text{—————}$$

### 1.2.2.5 Ventajas y desventajas

Principales ventajas del Método de Balance de Materia:

- Económico
- Se requiere de poca información
- Da una buena aproximación del comportamiento del yacimiento
- Permite calcular volúmenes originales
- Es más exacto que los métodos volumétricos.
- Puede servir como base en el empleo de otros métodos
- Ayuda a determinar los diferentes mecanismos de empuje que actúan en el yacimiento.

Principales desventajas del Método de Balance de Materia:

- Considera homogéneas las propiedades de la roca y de los fluidos en todo el yacimiento, provocando un cierto error.
- No considera el movimiento de los fluidos.
- No toma en cuenta el factor geométrico del yacimiento, ya que no es posible conocer la distribución de los fluidos en la estructura.

### 1.2.2.6 Ejemplo de cálculo

Realizar un pronóstico de producción de un yacimiento, desde la presión actual hasta la presión de burbuja, a partir de los datos del análisis PVT, y considerando como mecanismos de empuje la expansión del aceite y la expansión del agua congénita.

- Volumen original (N) = 350000m<sup>3</sup>
- Saturación de agua inicia (Swi) = 17% = 0.17; → Soi = 1 – Swi = 1 – 0.17 = 0.83
- Compresibilidad del agua (Cw) = 0.000036 [kg/cm<sup>2</sup>]<sup>-1</sup>
- Presión inicial (Pi) = 200 [kg/cm<sup>2</sup>]
- Factor de Volumen del aceite inicial (Boi) = 1.3 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]
- Presión de burbuja (Pb) = 160 [kg/cm<sup>2</sup>]
- Factor de Volumen del aceite en el punto de burbuja (Bob) = 1.35 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

\_\_\_\_\_

Volumen de aceite @c.y.

Expansión del aceite

\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_ [kg/cm<sup>2</sup>]<sup>-1</sup>

Por tanto, la expansión del aceite es:

Expansión del agua congénita

\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_

Calculando la producción acumulada de aceite (N<sub>p</sub>)

\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_

### 1.2.3 Método de curvas de declinación

Este es un método que supera en exactitud a las técnicas volumétricas y al balance de materia ya que lleva implícito las heterogeneidades que se presentan en el yacimiento y la dirección de flujo de fluidos en las mediciones de gasto de producción, en las cuales se fundamenta. El método consiste en realizar una grafica que compare los gastos de producción contra el tiempo. De esta manera la curva obtenida podrá ser extrapolada a fin de estimar gastos futuros de producción y por ende hacer posible la determinación de las reservas del yacimiento.

Una suposición en el uso de curvas de declinación es que todos los factores que influenciaron la curva en el pasado, serán los mismos durante la vida productiva. Estos factores son los siguientes:

- Cambios en los métodos de producción
- Reparaciones
- Tratamientos a pozos
- Cambios en las condiciones de los aparejos o en las instalaciones superficiales de producción.

Una expresión general para el ritmo de declinación,  $D$ , puede ser expresada como:

\_\_\_\_\_

donde:

$D$  = ritmo de declinación

$q$  = ritmo de producción [ $bl/día$ ,  $bl/mes$ ,  $bl/año$ ]

$t$  = tiempo [ $días$ ,  $meses$ ,  $años$ ]

$k$  = constante

$n$  = exponente

El ritmo de declinación en esta ecuación puede ser constante o variable con el tiempo, dando lugar a tres tipos básicos de declinación de la producción:

1. Exponencial o declinación constante
2. Declinación hiperbólica
3. Declinación armónica

Para la determinación de cuál de los tipos de declinación se trata, se puede graficar el gasto de producción vs. el tiempo ( $q$  vs.  $t$ ), si el resultado es una línea recta la declinación es de tipo constante o exponencial, si es una curva se procederá a graficar el logaritmo natural del gasto de producción vs. logaritmo natural del tiempo ( $\ln q$  vs.  $\ln t$ ), si el resultado es una línea recta la declinación es de tipo hiperbólica, si es una curva la declinación es de tipo armónica.

### 1.2.3.1 Tipos de declinación a partir de la expresión general

Para obtener los tres tipos de declinación, los sustituimos en la ecuación general

- Declinación exponencial ( $n=0$ )

$q_0$  = gasto en cualquier instante de la producción.

$q_i$  =gasto inicial.

$D$  = constante de declinación

$t$  = tiempo

La producción acumulada:

- Declinación hiperbólica ( $0 < n < 1$ )

La producción acumulada:

\_\_\_\_\_

- Declinación armónica (n=1)

—

La producción acumulada:

— —

### 1.2.3.2 Ventajas y desventajas

Principales ventajas del Método de Curvas de Declinación:

- Es más exacto que los métodos volumétricos y el balance de materia.
- Nos da buena estimación de los pronósticos de producción.
- Permite obtener volúmenes originales.
- Permite realizar el cálculo de reservas.
- Considera de manera implícita la heterogeneidad del yacimiento.
- Considera de manera implícita la dirección de flujo de los fluidos.

Principales desventajas del Método de Curvas de Declinación:

- Requiere de mucha información.
- Si cambia alguna condición en el estado mecánico del pozo la extrapolación de las graficas se invalida.
- Si cambia el esquema de explotación la extrapolación de las graficas se invalida.

### 1.2.4 Método de Simulación Numérica

Actualmente el método de simulación numérica de yacimientos es el más exacto para realizar los pronósticos de producción, así como el cálculo de reservas, entre otras cosas. Este método consiste en dividir o discretizar al yacimiento en partes muy pequeñas llamadas “celdas” y asignarle a cada una, características y propiedades tanto de la formación como de los fluidos, acopladas a ecuaciones de balance de materia y de flujo de fluidos en medios porosos. Esto permite la consideración de las heterogeneidades y las direcciones de flujo de los fluidos en el yacimiento, lo cual da como consecuencia una aproximación muy cercana a la realidad acerca del comportamiento del yacimiento y por ende de los pronósticos de producción.

Las ecuaciones obtenidas al realizar un modelo matemático del yacimiento son ecuaciones diferenciales en derivadas parciales no lineales, cuya solución se obtiene mediante métodos numéricos de manera discreta, es decir, en un número de puntos preseleccionados en tiempo y en espacio.

La simulación matemática tiene como base a la ecuación de difusión

— — —

Que podemos obtener mediante la combinación y el tratamiento matemático de 3 ecuaciones:

- Ecuación de balance de materia:

- Ecuación de Darcy

— —

- Ecuación de Estado

— — — — —

Los modelos matemáticos son resueltos mediante el uso de simuladores, es decir programas de cómputo los cuales resuelven la ecuación mediante diferentes algoritmos de solución, teniendo la posibilidad de resolverlo para diferente número de dimensiones, así como diferente número de fases de la mezcla. Los simuladores serán las herramientas que nos permitan determinar la distribución de presiones y de saturaciones de los fluidos en cada nodo en el que dividamos el yacimiento. Si el simulador es correctamente ajustado con la historia de producción, RGA, índices de productividad de los pozos y demás datos, será el mejor método de todos los vistos durante el presente capítulo.

#### **1.2.4.1 Ventajas y desventajas**

Principales ventajas del Método de Simulación Matemática:

- Es un método muy exacto.
- Permite visualizar el comportamiento del yacimiento bajo distintos esquemas de explotación.
- Permite calcular volúmenes originales.
- Permite realizar pronósticos de producción muy cercanos a la realidad.
- Considera las heterogeneidades y las direcciones de flujo en el yacimiento.
- Si es ajustado y operado de manera adecuada, resultara la mejor herramienta.

Principales desventajas del Método de Simulación Matemática:

- Es un método que requiere de mucha información.
- Suele ser el método más costoso de los cuatro
- Puede requerir de grandes tiempos de cómputo y procesamiento de la información.
- Los simuladores no distinguen la calidad de la información.
- Requieren de un constante mantenimiento, así como de inteligencia de parte del operador.

## Capítulo 2 Evaluación económica de proyectos

Un proyecto es la búsqueda de una solución inteligente al planteamiento de un problema que tiende a resolver, entre otras cosas, una necesidad humana (Glinz, 2007); es un esfuerzo temporal emprendido para crear un producto o un servicio, siguiendo una cierta metodología definida, para lo cual precisa de un equipo de personas idóneas, así como de otros recursos cuantificados en forma de presupuesto.

Un proyecto consta de diversas etapas, sin embargo en esta tesis, no es el propósito de analizarlas, por ello nos enfocaremos en la etapa de evaluación, dándole mayor importancia a la económica, ya que las opciones reales son una metodología muy específica para este propósito.

A la etapa de evaluación también se le suele llamar estudio de factibilidad, en ella se busca evaluar todos los aspectos que comprenden un proyecto:

- Evaluación económico-financiera
- Evaluación de impacto social y ambiental
- Estudio técnico
- Estudio jurídico

La importancia de cada uno de los estudios dependerá de la naturaleza de cada proyecto, y será gracias a la etapa de evaluación, cuando se determine si un proyecto se lleva a cabo, se mantiene en espera o se desecha.

El proceso de evaluación, en general, como podemos consta de los siguientes pasos:

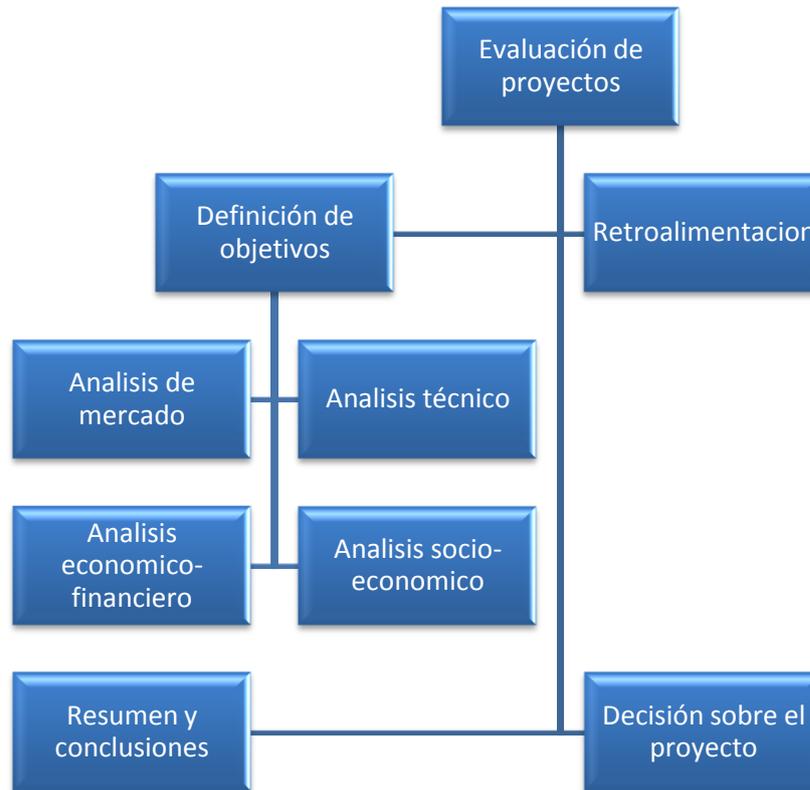


Figura 3: Evaluación de proyectos (Glinz, 2007)

En este capítulo nos enfocaremos a la evaluación económica, pues abordaremos algunas de las metodologías más utilizadas por las compañías petroleras: el valor presente neto, los árboles de decisión y la simulación de Monte Carlo.

## 2.1 Conceptos técnicos de Ingeniería Económica

### 2.1.1 Variables económicas

Son los parámetros que nos permitirán evaluar y determinar si un proyecto es capaz de generar ganancias después de invertir cierto capital. Una vez realizado el proceso de evaluación de estas variables, se llevara a cabo la toma de decisiones.

Las variables que intervienen en la evaluación son aquellas que definirán si el proyecto es capaz de generar ganancias, estas serán determinadas, por medio de estudios de factibilidad técnica, económica y de mercado, para que posteriormente mediante la aplicación de métodos de evaluación económica, se tome la decisión.

Las principales variables son:

- Producción de hidrocarburos: estimada a partir de las capacidades técnicas de la empresa encargada de la explotación del yacimiento, así como de la capacidad propia del yacimiento. Hablando de una manera muy simplificada, los ingresos se obtienen a partir de la multiplicación de la producción por el precio de la misma.
- Los egresos serán los costos de operación a causa de la tecnología utilizada, el personal, etc. y la inversión inicial requerida al inicio del proyecto; de igual forma, visto de manera sencilla la obtención de los egresos será a partir de la suma de los costos de operación y de la inversión inicial

Lo primero que haremos será estudiar cómo se determinan las variables antes mencionadas:

#### **2.1.1.1 Precios de hidrocarburos**

El precio es la variable más importante en la evaluación económica, pues la variación de éste es la que tiene el mayor impacto en el resultado de un proyecto, ya sea en el éxito o en el fracaso, sin embargo también es la variable que lleva el mayor riesgo asociado.

El precio repercute tanto, que en ocasiones hay proyectos en los que se tiene baja producción, o su inversión en tecnología sea considerable, sin embargo cuando los precios se encuentran elevados o se tiene la probabilidad de que suban, dichos proyectos, que en otro momento no eran rentables, tras la evaluación económica resulten favorables teniendo ingresos mayores a los egresos.

La variación de los precios puede incluso provocar una reclasificación de reservas, puesto que reservas previamente clasificadas como probables ante un alza en el precio, se pueden volver económicamente rentables a pesar de una costosa inversión para su explotación, siendo ahora reclasificadas como probadas.

Para la determinación del precio es necesario tomar en cuenta la oferta, la demanda y el precio previo, tanto para los hidrocarburos como para sus derivados; así como el riesgo político, económico y técnico. Además el precio también es función de la calidad de los hidrocarburos; la calidad, la cual va ligada con la densidad de éstos: un crudo, entre más ligero tendrá una mayor densidad API y por ende una mayor calidad, esta variación en el

precio, se debe a que a mayor calidad, se requiere un proceso de refinación más sencillo y sus derivados también tienen un mayor valor.

### 2.1.1.2 Producción

Como ya lo mencionamos, la producción impacta directamente en los ingresos, en muchas ocasiones, la decisión de realizar un proyecto o no, depende en su mayoría de la producción que se espera obtener. Para la determinación y cuantificación de la producción, es necesario llevar a cabo un profundo estudio técnico en el que se evalúen las reservas del yacimiento, la infraestructura con la que se cuenta o se planea adquirir y la tecnología disponible.

Para la evaluación de reservas podemos consultar el primer capítulo de la presente tesis, en la que abordamos este tema.

### 2.1.1.3 Costos

Son todos los gastos necesarios para mantener en operación el proyecto, esto incluye los bienes y servicios que se han requerido, o se requerirán para obtener el producto de nuestro proyecto. Los costos son erogados para mantener el proceso de producción; los gastos realizados al inicio del proyecto, con el propósito de ponerlo en marcha no se le consideran costos.

Los costos serán determinados en función de la infraestructura y su mantenimiento requerido, de los productos y los servicios que se necesitan, así como de la eficiencia en el uso de estos recursos. Los costos pueden ser clasificados en diversos tipos según la forma de imputación a las unidades de producto en: variables o fijos.

**Costos variables:** son los gastos directamente proporcionales a la cantidad de producción o servicio, entre los principales podemos destacar:

- Materias primas
- Mano de obra directa
- Materiales
- Costo de operación del equipo
- Impuestos generados por la producción

**Costos fijos:** son aquellos gastos que existen por el solo hecho de existir la empresa, independientemente si la empresa produce o no, o provee o no sus servicios y que deben afrontarse para el mantenimiento y funcionamiento de la empresa, entre estos podemos mencionar:

- Sueldo y honorario de los empleados de base
- Mantenimiento
- Servicios
- Impuestos fijos
- Alquileres
- Cargo por depreciación

#### **2.1.1.4 Inversiones en los proyectos**

Es la cantidad de dinero necesaria para poner en marcha el proyecto al inicio de este. “es la aplicación de recursos financieros, ya sea de índole pública o privada, destinados a obtener un beneficio o un servicio a lo largo de un plazo previsto (vida útil)” (GASTELUM, 2008).

La inversión se cuantifica mediante el costo de todos los elementos tanto físicos (maquinaria, equipo, terrenos, etc.) como de capital de trabajo, que permitirán la puesta en marcha de un cierto proyecto o la actualización de éste, ya que las erogaciones posteriores se contabilizan como costos.

#### **2.1.1.5 Tiempo**

El tiempo juega un papel fundamental en el proyecto, para cualquier metodología de evaluación, el tiempo será un factor determinante, pues al transcurrir de éste las condiciones de mercado cambian y con ello el valor de los proyectos.

El momento en el que se ponga en marcha un proyecto puede llegar a ser fundamental en el valor final que éste nos pueda otorgar.

#### **2.1.2 Indicadores económicos**

La evaluación económica de un proyecto se realiza mediante el análisis de los indicadores económicos, éstos nos permiten conocer y evaluar los flujos de efectivo (ingresos-egresos)

durante el tiempo. Conociendo estos indicadores y utilizando las metodologías de evaluación, podremos conocer el valor del proyecto durante el tiempo y con esto determinar el proceso a seguir.

### 2.1.2.1 Valor presente neto.

El Valor Presente Neto (VPN) es el indicador más utilizado en la industria petrolera, esto debido a su sencillez para obtenerlo y aplicarlo; además tiene la ventaja de que transforma todos los flujos de efectivo (ingresos y egresos) al tiempo actual a una tasa determinada, permitiéndonos comparar y así conocer las posibles ganancias.

El VPN es un indicador base en todas las metodologías de evaluación de proyectos, principalmente en el análisis de flujos descontados, por tanto, el valor que nos arroja nos sirve de base también en las opciones reales. La forma de cálculo es la siguiente:

—————

Lo anterior expresado en forma matemática quedaría representado como:

**Donde:**

$VPN$  = valor presente neto

$S_t$  = flujo de efectivo neto del período  $t$  (ingresos-egresos)

$n$  = número de períodos de vida del proyecto

$i$  = tasa de interés considerada

$t$  = periodo en el que nos encontramos

El criterio de decisión es muy sencillo, y es el siguiente:

- $VPN = (+)$ ; el proyecto otorga ganancias, ya que los ingresos superan los egresos, las inversiones a una tasa determinada de descuento
- $VPN = 0$ ; el proyecto no otorga ni pérdidas ni ganancias
- $VPN = (-)$ ; considerando los ingresos, egresos, las inversiones a una tasa determinada de descuento el proyecto genera pérdidas

Lo más complicado del método radica en la tasa de descuento utilizada, la cual determina el valor del VPN.

**Ventajas:**

- Cálculos muy sencillos
- Considera el valor en el tiempo
- Considera todos los flujos de caja, homogeneizándolos a través del tiempo

**Desventajas:**

- Mide la rentabilidad en valor absoluto, depende de la inversión inicial y puede resultar complicado de comparar con otros proyectos con diferente inversión y diferente plazo de tiempo
- Es estático

**2.1.2.2 Tasa interna de retorno.**

La TIR es aquella la tasa de descuento hasta el cual una inversión genera un VPN positivo o uno negativo, es decir nos expresa los límites bajo los cuales el proyecto es rentable o no. La tasa interna de retorno es aquella tasa de interés  $i$  que satisface la siguiente ecuación:

\_\_\_\_\_

**Donde:**

$S_t$  = Flujo de efectivo del período  $t$

$n$  = Vida de la propuesta de inversión

$i$  = tasa interna de rendimiento

$t$  = periodo en el que nos encontramos

Este indicador depende de:

- Tiempo: nos dice el periodo de validez de dicha tasa, y hay que considerar que a mayor tiempo mayor riesgo, debido a que las condiciones bajo las cuales se fija la tasa, tienden a variar.
- La tasa libre de riesgo: esta depende del sector bancario, y de diversos factores de la economía propia del país, los cuales no son parte del objetivo de la presente tesis.

Para que la TIR sea favorable esta debe ser mayor a la tasa libre de riesgo.

**Ventajas:**

- Cálculos muy sencillos, al igual que el VPN
- Considera el valor en el tiempo
- Considera todos los flujos de caja, homogeneizándolos a través del tiempo

**Desventajas:**

- Mide la rentabilidad en valor absoluto, depende de la inversión inicial y puede resultar complicado de comparar con otros proyectos con diferente inversión y diferente plazo de tiempo
- Es estática

**2.1.2.3 Relación Costo Beneficio (C/B)**

La relación costo/beneficio nos dice cuánto obtenemos a partir de lo que invertimos, es un indicador muy claro y útil, ya que nos permite visualizar de una manera clara y sencilla, mediante un cociente el beneficio que nos genera la inversión.

---

Esta relación es muy sencilla de entender, cuando el cociente es mayor que 1 tenemos un proyecto favorable y nos otorga ganancias, cuando es menor que 1 el proyecto nos generará pérdidas.

**2.1.2.4 Límite económico (LE)**

El límite económico es el punto en el tiempo en el que los egresos se vuelven mayores a los ingresos. Define la fecha en la cual un proyecto deja de ser rentable, ya que los costos de producción han superado la capacidad del proyecto para generar ganancias. Por lo tanto un proyecto nunca debe exceder este periodo de vida útil, ya que el hacerlo provocaría pérdidas para la compañía.

Para que un proyecto sea rentable, el límite económico debe ser mayor que el periodo de recuperación, es decir que haya pasado el tiempo suficiente para que el proyecto haya generado las ganancias suficientes para al menos recuperar las inversiones y los gastos.

## 2.2 Conceptos de Probabilidad

La probabilidad es la rama de las matemáticas que se ocupa de medir o determinar cuantitativamente la posibilidad de que ocurra un determinado suceso, y por ello es la herramienta fundamental en la evaluación de proyectos para conocer las posibilidades que tiene de éxito un proyecto, así como los posibles escenarios que pueden presentarse.

La probabilidad es una herramienta en la que mediante un modelo matemático, podemos obtener valores del riesgo, la incertidumbre y calcular la posibilidad de que un determinado evento ocurra.

### 2.2.1 Definición clásica de probabilidad

La probabilidad  $p$  de aparición de un suceso  $S$  de un total de  $n$  casos posibles igualmente factibles es la razón entre el número de ocurrencias  $h$  de dicho suceso (casos favorables) y el número total de casos posibles  $n$ .

$$p = P\{S\} = h / n$$

La probabilidad es un número (valor) entre 0 y 1. Cuando el suceso es imposible se dice que su probabilidad es 0 y se dice que es un suceso cierto cuando siempre tiene que ocurrir y su probabilidad es 1. La probabilidad de no ocurrencia de un evento está dada por  $q$  donde:

$$q = P\{noS\} = 1 - (h / n)$$

### 2.2.2 Estadística

La Estadística es la rama de las matemáticas que se ocupa de reunir, organizar y analizar datos numéricos y que ayuda a resolver problemas como el diseño de experimentos y la toma de decisiones. Esta puede ser dividida en dos categorías, la “estadística descriptiva” y la “estadística inferencial”.

- La estadística descriptiva implica la abstracción de varias propiedades de conjuntos de observaciones, mediante el empleo de métodos gráficos, tabulares o numéricos. Entre estas propiedades, están la frecuencia con que se dan varios valores en la observación, la noción de un valor típico o usual, la cantidad de variabilidad en un conjunto de datos observados y la medida de relaciones entre dos o más variables.
- La estadística inferencial se refiere a los procedimientos y técnicas como son las medidas de tendencia central, las medidas de dispersión, las distribuciones de probabilidad, entre otras; mediante las cuales se pueden hacer generalizaciones o inducciones acerca de una población, a partir de una muestra representativa de ésta.

### 2.2.2.1 Medidas de tendencia central

Consiste en el valor que sea representativo de los datos contenidos en un espacio muestral. Siendo así, a las medidas capaces de inferir o describir un valor típico que represente el comportamiento de un fenómeno o variable en un grupo de observaciones se les suele llamar medidas de tendencia central.

### 2.2.3 Teorema de Bayes

El Teorema de Bayes, proporciona la distribución de probabilidad condicional de un evento "A" dado otro evento "B" (probabilidad posteriori), en función de la distribución de probabilidad condicional del evento "B" dado "A" y de la distribución de probabilidad marginal del evento "A" (probabilidad simple o a priori). Vamos a ver su desarrollo:

Partiendo de las fórmulas de probabilidad condicional

\_\_\_\_\_

Y probabilidad conjunta

Para eventos estadísticamente dependientes

Sean,  $A_0, A_1, \dots, A_N$ , eventos mutuamente excluyentes tales que, cualquier evento "B" en el espacio muestral pertenece a uno y sólo a uno de estos evento. Entonces la probabilidad de que ocurra cualquier evento  $A_K$  dado que ha ocurrido el evento "B" se calculará por la siguiente fórmula:

---

Por lo tanto, sustituyendo la fórmula de probabilidad condicional, se obtiene la fórmula general para el Teorema de Bayes:

---

Donde:

- El numerador es la probabilidad conjunta:
  
- El denominador es la probabilidad marginal de que ocurra el evento "B"

Como "A" y "B" son eventos estadísticamente dependientes, el Teorema de Bayes se puede representar también utilizando el diagrama de árbol.

#### **2.2.4 Valor de la información**

El valor de la información, es el incremento o disminución del valor agregado de un cierto activo como consecuencia de la adquisición de datos y/o información, desde el punto de vista matemático lo podríamos expresar así:

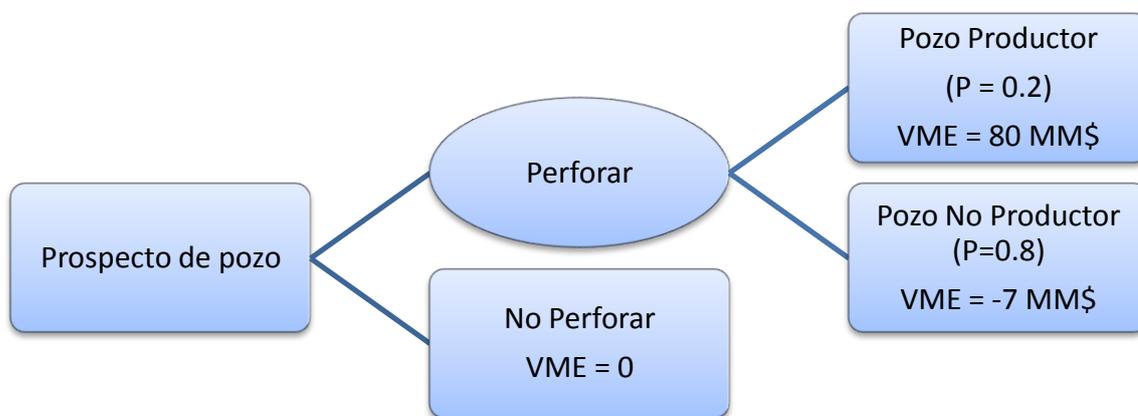
El valor de la información, es una función directa de lo siguiente:

- El VDI aumenta a medida que la incertidumbre es mayor
- El VDI aumenta al aumentar la magnitud del impacto monetario futuro de la decisión, es decir cuánto afectaría tomar la decisión correcta o incorrecta en el proyecto.
- La confiabilidad de la información

Este valor es un caso particular para cada activo y es necesario un programa propio de adquisición de información. El método para obtener el VDI, se basa en el árbol de decisión, de una manera un tanto similar al que utilizaremos posteriormente al aplicar la teoría de opciones reales para los retículos binomiales durante el desarrollo de la presente tesis.

Vamos a ver un ejemplo utilizando el método VDI:

En la siguiente figura, se tiene un prospecto de pozo, así como la decisión de no perforarlo o perforarlo, a su vez con una probabilidad P de ser o no productor:



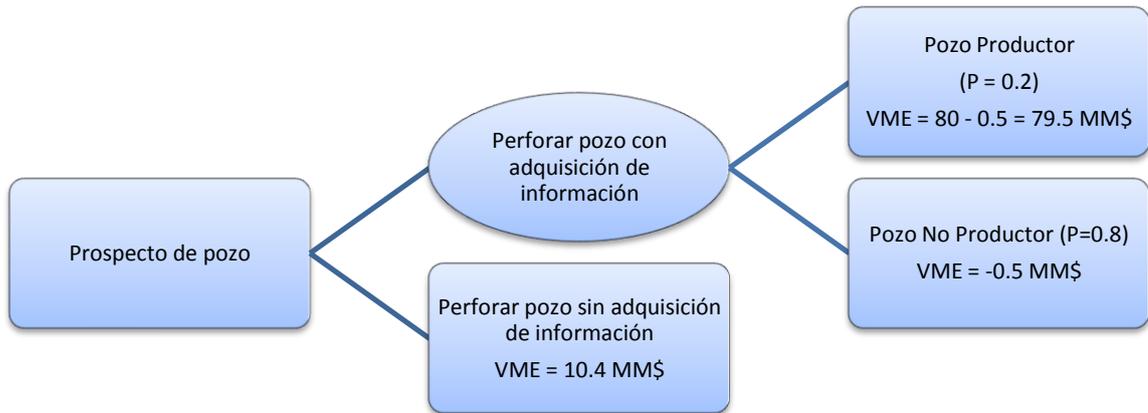
$$VPN = (80 * 0.2) - (7 * 0.8) = 10.4MM\$$$

Figura 4: Prospecto de pozo a perforar

El costo de adquirir la información suficiente para nuestro proyecto es de 0.5 MM\$.

Es importante recalcar que la información que estamos adquiriendo es información “perfecta”, es decir que por medio de esta tendremos la certeza de saber o no si el pozo es productor.

Tendríamos como resultado el diagrama mostrado en la siguiente figura:



$$VPN = (79.5 * 0.2) - (0.5 * 0.8) = 15.5 \text{ MM\$}$$

Figura 5: Prospecto de pozo considerando la adquisición de información

Podemos ver como al adquirir información, el VPN del proyecto aumenta, esto se debe a que disminuyen las pérdidas en caso de no resultar productivo el pozo, ya que aunque no cambian las probabilidades de que el pozo resulte o no productivo, podemos disminuir la pérdida de perforar un pozo que no resultara productivo.

$$\text{Valor de la información} = 15.5 - 10.4 = 5.1 \text{ MM\$}$$

### 2.2.5 Distribuciones de probabilidad

Las distribuciones de probabilidad son el punto medular en la evaluación probabilística de proyectos, debido a que la construcción de éstas, nos permiten determinar con una buena certeza la incertidumbre y los riesgos asociados con los proyectos petroleros, a partir de la limitada información con la que se cuenta, dando como resultado, las bases sólidas que se requieren para tomar y justificar algún tipo de decisión.

En estadística la distribución de probabilidad  $F(x)$  es una función de la probabilidad que representa los resultados que se van obteniendo en un experimento aleatorio, es decir, una distribución de probabilidad es una manera de expresar el rango de posibles valores para una variable incierta con sus respectivas probabilidades de ocurrencia.

La construcción de las distribuciones de probabilidad para las variables involucradas en el proceso de evaluación económica (producción, precio, inversión, costos) responde a circunstancias, que dan como consecuencia variaciones en parámetros, como la heterogeneidad que presentan los yacimientos, refiriéndonos al aspecto técnico, y a situaciones de tipo político, hablando en el aspecto económico; por lo que la construcción de estas corre a cargo de grupos multidisciplinarios integrados por expertos, los cuales se basan en una gran cantidad de estudios, experimentos y simulaciones, con la finalidad de realizar una distribución de probabilidad que sea confiable y bastante representativa del fenómeno en cuestión.

#### **2.2.5.1 Distribución de probabilidad de variables discretas y de variables continuas**

Una propiedad importante de una distribución de probabilidad es conocer si ésta es de tipo discreta o continua, ya que en la industria petrolera una distribución de tipo discreta se aplica a la descripción de variables tales, como el número de pozos secos o exitosos, los aforos realizados en un año, entre otras, debido a que la variable aleatoria toma un valor en concreto; mientras que una distribución de tipo continua es empleada para describir el comportamiento de variables como el precio o la porosidad, ya que, lo más probable es que los datos recabados no sean completamente exactos u homogéneos, por lo que se tienen que manejar en intervalos.

#### **2.2.5.2 Distribuciones de probabilidad para variables discretas**

Se denomina distribución de variable discreta a aquella que es aplicada a la descripción de variables que toman una cantidad numerable y concreta cuya función de probabilidad sólo toma valores positivos en un conjunto de valores “x” finito o numerable. A dicha función se le llama función de masa de probabilidad.

En este caso la distribución de probabilidad es la sumatoria de la función de masa, por lo que tenemos entonces que:

Tal como corresponde a la definición de distribución de probabilidad, esta expresión representa la suma de todas las probabilidades hasta el valor de “x”.

Las propiedades de las distribuciones de variables discretas son dos:

- $0 \leq P(X=x) \leq 1$ .
- $\sum P(X=x) = 1$

Por lo tanto: la suma de todas las probabilidades de los eventos posibles de una variable aleatoria es igual a la unidad.

Hay que hacer notar que estas propiedades se enuncian suponiendo que conocemos el valor de la probabilidad, pero en la realidad esto no ocurre, es decir que no sabemos la probabilidad y lo que se hace es trabajar con estimaciones. Precisamente esto nos lleva a modelos teóricos que estiman los resultados, los principales son los que a continuación se presentan.

#### 2.2.5.2.1 Modelos de distribuciones de probabilidad de variables discretas

- **Uniforme:** Es la distribución donde todos los eventos elementales tienen la misma probabilidad. Por ejemplo: tirar un dado, donde la función:

$$P(X = x) = \frac{1}{6} \text{ para valores de } x = 1,2,3,4,5,6.$$

- **Binomial:** Es la que maneja la distribución de la probabilidad de obtener cierta cantidad de éxitos al realizar una cantidad de experimentos con probabilidad de éxito constante y con ensayos independientes
- **Geométrica:** Es la distribución de la probabilidad de realizar cierto número de experimentos antes de obtener un éxito
- **Hipergeométrica:** Es similar a la binomial, pero con un tamaño de muestra grande en relación al tamaño de la población
- **De Poisson:** Es la distribución de la probabilidad de que ocurra un evento raro en un periodo de tiempo, un espacio o un lugar

### 2.2.5.2.2 Media y desviación estándar de una distribución de probabilidad para variables discretas.

Considerando la definición de probabilidad de un evento, que es el cociente de la frecuencia entre el número total de eventos; se tiene que, la media de una distribución de probabilidad de una variable discreta es:

$$\mu = \sum x \cdot P(x)$$

Similarmente, se tiene que la varianza para una distribución de probabilidad de una variable discreta, se encuentra dada por:

$$S^2 = \sum (x - \mu)^2 \cdot P(x)$$

Consecuentemente, la desviación estándar de una distribución de probabilidad de una variable discreta es:

---

### 2.2.5.3 Distribuciones de probabilidad para variables continuas

En las distribuciones de probabilidad para variables discretas, se puede asignar el valor que toma la función de probabilidad cuando la variable aleatoria tomaba un valor en concreto. Sin embargo, al considerar las variables continuas se encuentra uno el problema de que, lo más probable, es que los datos que se puedan recabar no sean completamente exactos, o que el valor que tome la variable se encuentre contenido en todos los posibles a lo largo de una recta, por lo que estas, se tienen que trabajar en intervalos, es decir, que en el caso de las variables continuas solo se puede calcular la probabilidad de que un evento caiga dentro de un intervalo.

Por lo que la probabilidad de que la variable aleatoria continua tome un valor exacto es nula. En este contexto, se denomina variable continua a aquella que puede tomar cualquiera de los infinitos valores existentes dentro de un intervalo, es decir, son aquellas que pueden tomar cualquier valor en un intervalo real. En este caso de distribución de probabilidad es la integral de la función de densidad:

Y para la probabilidad de que la variable aleatoria tome un valor exacto se tiene que:

### 2.2.5.3.1 Modelos de distribución de probabilidad de variables continuas

- **Uniforme:** es la distribución en donde todos los eventos tienen la misma probabilidad de ocurrencia
- **Exponencial:** se utiliza para estudiar el tiempo entre dos sucesos
- **Beta:** sirve para el estudio de variaciones, a través de varias muestras, de un porcentaje que representa algún fenómeno
- **Gamma:** se utiliza para estudiar variables cuya distribución puede ser asimétrica
- **Normal:** es la distribución más utilizada porque la mayoría de las variables analizadas en fenómenos sociales se distribuyen aproximadamente siguiendo este modelo

La curva de la distribución normal puede ser modelada utilizando la función:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Donde  $\mu$  y  $\sigma$  son los parámetros y corresponden a la media y a la desviación estándar, respectivamente, cuyos valores son todos los reales para  $\mu$  y para  $\sigma$  son los reales positivos y el dominio de  $f$  es el conjunto de los números reales.

Dado que para variables continuas la probabilidad de que  $x$  tome un valor en el intervalo  $(a,b)$  es el área bajo la curva limitado por rectas verticales que pasan por  $a$  y  $b$ , entonces se puede encontrar la probabilidad integrando:

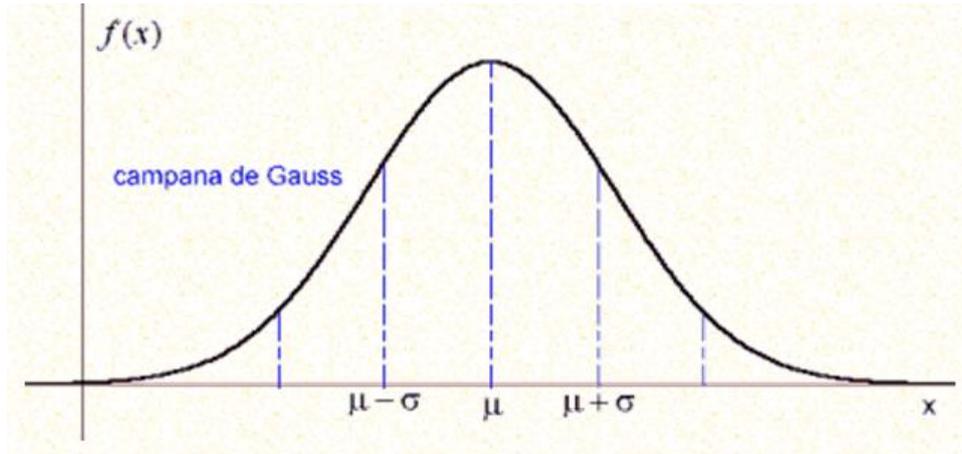


Figura 6: Gráfica de la distribución normal de probabilidad o campana de Gauss

- **Distribución log-normal:** se dice que una variable  $x$  se distribuye de forma log normal si su logaritmo natural se distribuye normalmente. Se simboliza mediante  $L(\mu, \sigma)$  ya que los parámetros de esta distribución son los mismos de los de la distribución normal,  $\mu$  y  $\sigma$ . Esta distribución es usada para modelar datos que presentan asimetría positiva, y cuya función de densidad esta dada por:

$$\frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}$$

### 2.3 Metodologías para la evaluación proyectos

En la industria petrolera, como en cualquier otra industria, es necesario seguir una metodología para determinar el valor que tiene un proyecto, éste proceso consta de varias etapas. La primera etapa de la evaluación de económica utiliza diferentes métodos de análisis o criterios para calcular la rentabilidad económica del proyecto. Se valen de diversos tipos de indicadores económicos como: el valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR) que determinan el valor del dinero en el tiempo, y otros que no lo hacen así, pero que son de gran utilidad a la hora de verificar el valor que puede generar el proyecto. En este proceso de evaluación se busca la viabilidad (posibilidad de realización) tanto objetiva y técnica, como económica y de mercado para el proyecto.

### 2.3.1 Unidad de inversión

El primer paso del proceso de evaluación consiste en la identificación de la oportunidad a la cual se pretende asignar un determinado monto de capital, a ésta se le conoce como “unidad de inversión” y es definida como el conjunto mínimo de todos los elementos físicos y normativos necesarios para generar valor. Ésta es la unidad de análisis más pequeña, que por si sola, puede generar valor económico, en otras palabras, para una compañía petrolera la perforación de un pozo como tal no es considerada como un proyecto al cual se le puede asignar un determinado monto de capital para su ejecución, es necesario incluir todos los elementos físicos para que el proyecto genere valor, como serían tuberías, separadores, compresores, entre otros. Por tanto en la industria petrolera la valoración de la rentabilidad de un proyecto se realiza sobre una unidad de inversión.

Ejemplos de una correcta unidad de inversión:

- Exploración de un área o prospecto, incluyendo estudios geológicos, geofísicos, perforación y terminación de pozos exploratorios y posible desarrollo (pozos, infraestructura complementaria, ductos y equipos)
- Desarrollo de un determinado campo, incluyendo perforación y terminación de pozos, construcción de ductos, equipos e infraestructura necesarios para la producción de hidrocarburos
- La implementación de un método de recuperación secundaria incluyendo perforación y terminación de pozos de inyección, construcción de ductos, tanques y equipos necesarios para incrementar el volumen de producción

Ejemplos de una incompleta unidad de inversión:

- Análisis independiente de un pozo exploratorio
- Análisis independiente de equipos para desarrollo de un campo
- Análisis independiente de bombeo neumático

### 2.3.2 Tipos de unidades de inversión

Podemos dividir los tipos de unidades de inversión en tres diferentes tipos los cuales a su vez se irán subdividiendo como podemos ver en la siguiente figura:

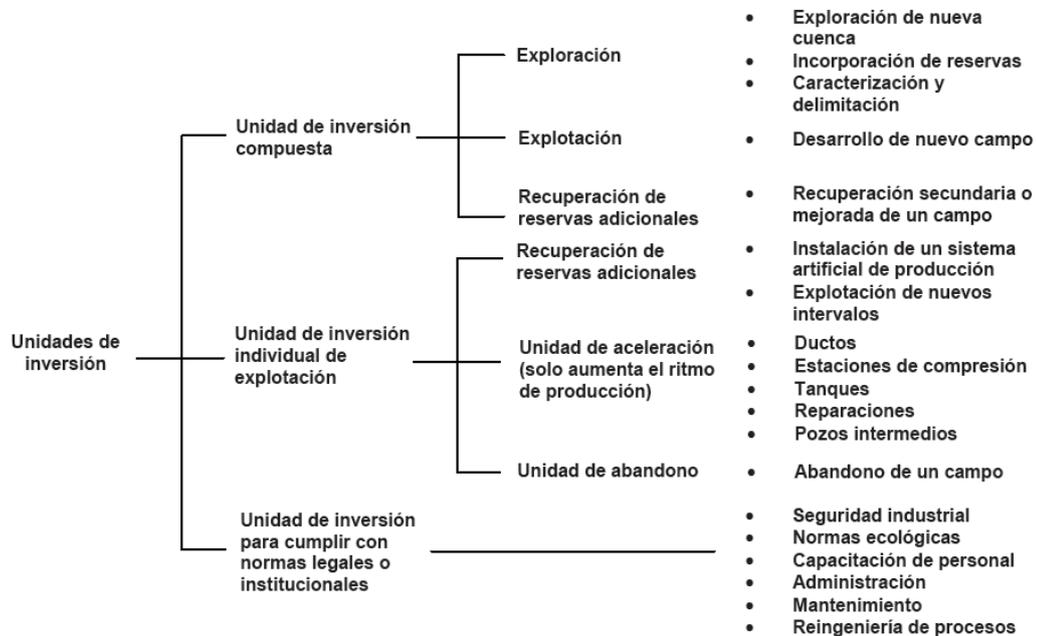


Figura 7: Unidades de inversión (GASTELUM 2007)

- Unidad de inversión individual: se denomina de esta manera a un proyecto si es de tipo unitario, por ejemplo:
  - Pozos de desarrollo
  - Ductos
  - Estaciones de compresión
  - Tanques
  - Instalación de un Sistema Artificial de Producción (SAP) para un pozo
  
- Unidad de inversión compuesta: se denomina de esta manera al proyecto, si esta hecho de un conjunto de unidades de inversión individuales:
  - exploración de una nueva cuenca
  - incorporación de reservas
  - recuperación secundaria o mejorada de un campo

- instalación de un Sistema Artificial de Producción (SAP) para varios pozos

Por último, dentro de la clasificación para las unidades de inversión, se encuentran las unidades para cumplir con normas legales o institucionales (proyectos de seguridad industrial, capacitación de personal, mantenimiento, entre otros).

### **2.3.3 Estudio de mercado de hidrocarburos**

La siguiente etapa del proceso de evaluación consiste en la realización del estudio de mercado, este análisis tiene como objetivo proporcionar el entorno económico y de mercado en que se desarrollarán los proyectos de inversión.

En el estudio de mercado básicamente se analiza el comportamiento histórico de la demanda, la oferta y el precio de los hidrocarburos así como sus derivados y los factores de riesgo tanto de tipo político como de tipo naturales, entre los que destacan: conflictos bélicos, la industrialización, desastres naturales, etc. El objetivo es extrapolar el comportamiento de estos indicadores para prever una política adecuada de precios y de comercialización.

### **2.3.4 Estudio técnico**

La tercera etapa del proceso se corresponde a un análisis profundo y objetivo por especialistas del tema que se trate y consiste en revisar que las especificaciones se ajusten a las necesidades reales de la producción o del producto. Dichas especificaciones deberán estar correctamente aplicadas, es decir, la elección de alguna tecnología estará en función de la opción que resuelva el problema, generando los máximos beneficios, cumpliendo con las condiciones técnico-operativas.

Esta etapa del proceso permite comparar y evaluar diversas alternativas técnicas de funcionamiento del proyecto y detectar posibles problemas técnicos, además de cuantificar el monto al cual asciende la inversión para la tecnología elegida y los costos que generará su funcionamiento.

### **2.3.5 Análisis económico financiero**

La penúltima etapa del proceso es el análisis económico el cual tiene como objetivo ordenar y sistematizar la información de carácter económico, se determinan los costos totales y la inversión inicial que proporcionan las etapas anteriores y se elaboran los cuadros analíticos que servirán como base para la determinación de la rentabilidad del proyecto (Evaluación económica).

### **2.3.6 Evaluación económica**

La evaluación económica es la parte final de la secuencia de análisis de la factibilidad de un proyecto, en esta etapa del proceso se definirá si el proyecto es capaz de generar ganancias, es decir, si no han existido contratiempos, en este momento ya se conocerá y dominará el proceso de producción, así como los costos en los que se incurrirá en la etapa productiva. Además se habrá calculado la inversión necesaria para llevar a cabo el proyecto; pero aun no se ha demostrado que la inversión propuesta será económicamente rentable, por lo que en este momento es necesario recurrir a las técnicas o métodos de evaluación los cuales se basan en el análisis de los distintos indicadores económicos como el VPN y la TIR, los cuales son los más importantes ya que toman en cuenta el valor del dinero a través del tiempo, con el objetivo de determinar el comportamiento de los flujos de efectivo (ingresos y egresos) que arroje el proyecto a lo largo de su vida productiva, y de esta manera poder determinar si el proyecto es rentable o no, para finalmente poder realizar una decisión bien pensada y estructurada acerca de la ejecución del proyecto.

#### **2.3.6.1 Análisis de Flujos Descontados**

El análisis del flujo de fondos descontado (DCF por sus siglas en inglés) es la herramienta de evaluación de inversiones más utilizada hasta ahora en la industria petrolera, ésta utiliza escalas de tiempo de inversión así como el valor del dinero en el tiempo. Éste concepto, se basa en la idea que una cantidad de dinero recibida en algún momento en el futuro vale menos que la misma cantidad recibida hoy.

En cualquier caso de explotación en la industria petrolera, transcurre un periodo de tiempo (años) entre el momento de realizar los gastos de exploración y de explotación hasta que se tenga el primer barril de producción.

La mayor parte de los costos primarios e inversiones se realizan en los primeros años de exploración, mientras que los ingresos se distribuyen a lo largo de la etapa de producción de un campo.

El dinero recibido más adelante gracias a la venta del petróleo producido, vale menos que la misma suma pagada con anterioridad, ya que no se dispuso de ese dinero para devengar intereses durante los años intermedios.

Basándonos en esto, el análisis DCF es una forma de determinar el valor actual del dinero invertido a ser recibido en el futuro. El Valor Presente Neto (VPN) permite determinar si el proyecto dejara ganancias o no. El VPN, como ya lo vimos en la primera parte de éste capítulo es la suma de los flujos de fondos descontados y representa la diferencia entre los valores actuales (descontados) de los egresos de fondos a lo largo de la vida del proyecto y los valores actuales de los ingresos de fondos. Como se concluyó previamente si el VPN es positivo, el proyecto debería ser considerado viable, y de no ser así empleando éste criterio debe ser rechazado.

Dentro del análisis de flujos descontados, el elemento clave es la tasa de descuento aplicada, por ejemplo si tenemos una tasa libre de riesgos (rf) a la cual un banco nos ofrece depositar el dinero, al utilizar esta tasa en nuestros cálculos y obtener un VPN negativo, es preferible guardar el dinero en el banco, de obtener un VPN positivo, significa que invertir el dinero en el proyecto nos otorga mayores ganancias que poner el dinero en el banco.

Vamos a ver un ejemplo:

Año	Inversión	Ingreso	Gasto	Flujo de fondos neto	Flujo de fondos descontados al 10%	Flujo de fondos descontados al 20%
0	-10,000	0	0	-10,000	-10,000	-10,000
1	0	5,000	-400	4,600	4,182	3,833
2	0	5,000	-400	4,600	3,802	3,194
3	0	5,000	-400	4,600	3,456	2,662
4	0	5,000	-400	4,600	3,142	2,218
5	0	5,000	-400	4,600	2,856	1,849
6	0	5,000	-400	4,600	2,597	1,541
7	0	5,000	-400	4,600	2,361	1,284
8	0	5,000	-400	4,600	2,146	1,070
<b>Totales</b>	<b>-10,000</b>	<b>40,000</b>	<b>-3,200</b>	<b>26,800</b>	<b>14,541</b>	<b>7,651</b>

Los cálculos de la tabla anterior se realizaron de la siguiente manera:

$$\text{Flujo de fondos neto} = \text{Ingreso} - \text{Gasto} - \text{Inversión}$$

---

En la tabla podemos ver que utilizando una tasa de descuento del 10% el valor del flujo neto de 4600 es de 14541 y 7651 con una tasa de descuento del 20%, esto significa que de invertir los 10,000 en el banco a una tasa del 10% estaríamos “dejando de ganar” 14,541.

La utilidad del DCF es muy limitada por su insensibilidad a las circunstancias cambiantes, siendo ésta el área de oportunidad para las opciones reales, pues no es posible analizar la flexibilidad de cambio dentro de un proyecto.

### 2.3.6.2 Evaluación probabilística

Antes de comenzar con las técnicas probabilísticas, explicaremos de una manera breve el proceso de análisis para la toma de decisiones:

El objetivo es tomar la decisión que:

- Se tome basándose en la lógica
- Considere todas las opciones posibles así como toda la información posible
- Se obtenga mediante la metodología adecuada.

Para la toma adecuada de una decisión es necesario analizarla de la siguiente manera:

1. Definir y delimitar el problema a resolver
2. Identificar todas las opciones posibles
3. Identificar todos los posibles resultados
4. Calcular la ganancia para cada combinación de opción y resultado
5. Seleccionar una metodología para la toma de la decisión
6. Aplicar dicha metodología y tomar la decisión

Además, las decisiones se pueden tomar bajo 3 diferentes ambientes, dependiendo de la incertidumbre y del riesgo asociado a la decisión:

- Toma de decisión bajo certidumbre: se conocen con certeza los resultados que se obtendrán en cada decisión, por ejemplo cuando guardamos dinero en el banco a un plazo fijo y a una tasa fija.
- Toma de decisión bajo incertidumbre: no se conocen las incertidumbres asociadas con los diferentes resultados de cada opción.
- Toma de decisión bajo riesgo: se conocen las probabilidades asociadas con cada uno de los resultados para cada opción.

Para este caso, es cuando utilizamos las técnicas de evaluación probabilística, en todos los casos, se tienen las siguientes características en común:

- Existen diferentes posibles resultados para cada decisión, sobre los cuales no se tiene el control.
- Para cada posible resultado anterior, conocemos la probabilidad asociada de que éstos ocurran
- Por medio de estos métodos, se le asocia un valor, dicho valor asocia tanto la probabilidad, como el resultado de ocurrir dicha opción, por lo tanto mediante estas técnicas conocemos así los valores de las opciones.

#### **2.3.6.2.1 Árboles de decisión**

Los árboles de decisiones son diagramas que muestran el flujo de un proceso de toma de decisiones como una secuencia de eventos y posibles resultados. Los eventos se representan como ramas que salen de cada nodo. Los nodos pueden ser de dos diferentes tipos:

- de decisión (en los cuales quien toma la decisión decide que rama seguir)
- de incertidumbre, donde el resultado estará determinado por las diferentes posibilidades, debido a que estos nodos de incertidumbre tienen la finalidad de mostrar en forma simplificada los valores más representativos de las variables definidas por distribuciones continuas (producción, costos, inversiones, precios, etc.).

A cada rama se le asocia el valor monetario que se espera del resultado. Además, las ramas que salen de los nodos de incertidumbre deberán ser evaluadas con la probabilidad de que tal resultado ocurra. El valor esperado de un nodo de incertidumbre es la suma de todos los valores esperados, y ponderados según las probabilidades, de todos los resultados que se ramifican desde dicho nodo.

Veamos un ejemplo:

Una empresa petrolera, desea conocer el valor de perforar un pozo en un yacimiento de aceite. Dicho pozo puede entregar 3 posibles resultados:

- Pozo no productor
- Producción de 50 Mbpd
- Producción de 90 Mbpd

Los resultados visualizados en una tabla son los siguientes:

Resultados	Probabilidad	Perforar		No Perforar	
		VPN	VME	VPN	VME
Pozo no productor	0.65	-40	-26	0	0
500 bpd	0.25	120	30	0	0
900 bpd	0.1	200	20	0	0
		Valor de Perforar	<b>24</b>	Valor de no Perforar	<b>0</b>

$P = \text{Probabilidad}$

$VPN = \text{Valor Presente Neto}$

$VME = \text{Valor Medio Esperado} = VPN * P$

Y se pueden ver los posibles resultados en la siguiente figura:

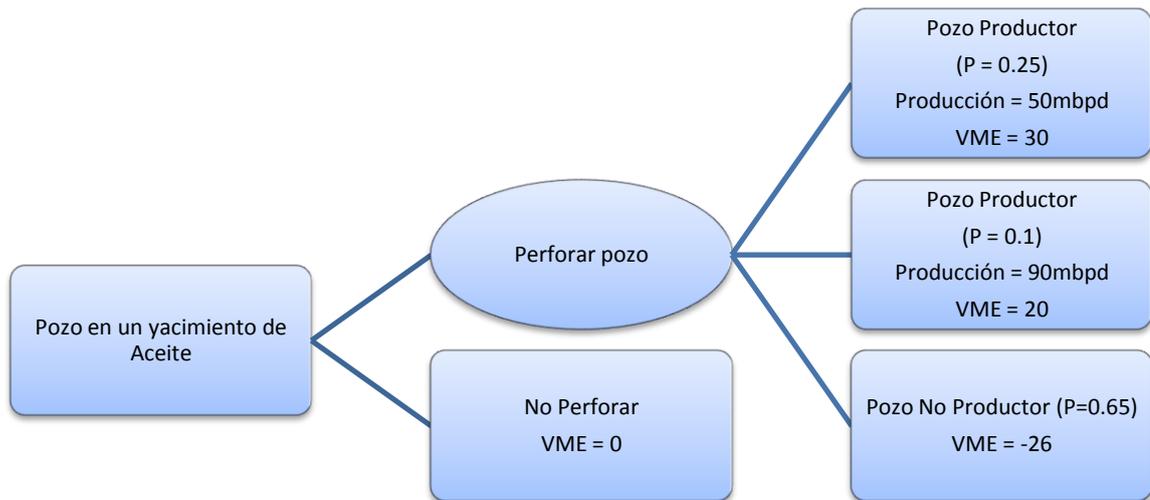


Figura 8: Árbol de decisión

- El nodo del Pozo en un yacimiento de aceite, es un nodo de decisión, en el cual se debe elegir entre perforar o no perforar dicho pozo.
- El nodo de Perforar, es un nodo de incertidumbre, en el que una vez que ha sido tomada una decisión, solo conocemos la probabilidad de ocurrencia de cada una de las opciones

El criterio al tomar la decisión es el de seleccionar el nodo de mayor VME, en el ejemplo la opción de perforar tiene un valor de 24, mientras que la opción de no perforar no genera ni valor ni pérdida.

- El método del árbol de decisión es sencillo en comparación con otros métodos
- Nos permite visualizar de manera gráfica los diferentes caminos a seguir en un proceso de toma de decisiones

### 2.3.6.2.2 Simulación de Montecarlo

Cuando realizamos un análisis de sensibilidad, variamos un parámetro a la vez, sin embargo si lo que queremos realizar es la variación de todas las posibles combinaciones de los parámetros que intervienen en la toma de una decisión debemos utilizar esta técnica, ya que la simulación de Monte Carlo nos permite visualizar todos los posibles escenarios en caso de presentarse algún valor en particular para alguna de las variables, es decir, que considera todo el rango de posibles valores de parámetros como: la producción, el precio, los costos, las inversiones, entre otras.

La simulación de Monte Carlo es una técnica cuantitativa que hace uso de la estadística y de los modelos matemáticos para con ello realizar operaciones con variables que presentan incertidumbre (aleatorias continuas). Y es esto la principal ventaja de este método, que considere el riesgo y la incertidumbre como factores integrales dentro de los cálculos, en lugar de tomarlos como consideraciones secundarias.

Es un método iterativo que consiste en generar una distribución de probabilidad para el resultado de la combinación de variables aleatorias, para ello se requiere previamente, la presentación de las variables por medio de distribuciones de probabilidad, como las que fueron vistas en este capítulo.

Una vez construidas las distribuciones de probabilidad, en la primera iteración se procede a realizar un muestreo aleatorio, individual, de los datos que integran cada una de las distribuciones (normalmente mediante la ayuda de una computadora), estos valores individuales se combinan a partir de las operaciones elegidas (suma, resta, multiplicación, etc.), dando como resultado un cierto valor; tras repetir “n” veces este proceso, dispondremos de “n” observaciones acerca del comportamiento del sistema o actividad que pretendamos analizar, lo cual nos permitirá construir su respectiva distribución de probabilidad. Entre mayor sea “n” mejor será la precisión de nuestra simulación

La simulación de Monte Carlo responde a la pregunta: si alguna cosa ocurre, ¿cuál es el rango de resultados posibles? La técnica genera la probabilidad en función de las relaciones de valor para los parámetros clave. Una utilidad práctica de esta técnica es conocer el rango de reservas recuperables y económicas de hidrocarburos en una región determinada, o por ejemplo conocer la probabilidad de que el VPN de un proyecto no alcance el objetivo de \$X millones.

Por ejemplo, el caso más común de utilización en nuestra industria es al momento de determinar las reservas de un yacimiento. En el capítulo 1.2 de la presente tesis, hablamos sobre los métodos determinísticos a detalle, mientras que los probabilísticos solo los comentamos brevemente, a continuación veremos cómo se hace este método con la Simulación de Montecarlo.

Como vimos en el capítulo 1.2, mediante los métodos volumétricos, la reserva será igual a:

Donde:

$R_f$  = recuperación final o reserva total, en [bl]

$A$  = área del yacimiento [ $m^2$ ]

$h$  = espesor promedio [ $m$ ] (intervalo productivo)

$\phi$  = porosidad promedio [fracción]

$S_{oi}$  = saturación de aceite inicial [fracción]

$B_{oi}$  = factor de volumen del aceite [bl/bl]

FR = factor de recuperación

Si los yacimientos fueran homogéneos, sería muy simple deducir las reservas recuperables de ese yacimiento, como lo realizamos en el ejemplo del capítulo mencionado, utilizando un valor único para cada parámetro. Pero, en la práctica, por lo general no es posible asignar valores únicos a cada parámetro.

Los geólogos y los ingenieros tienen que estimar valores promedio a través de todo el volumen de un campo, para propiedades tales como la porosidad y el volumen total de la roca (Área \* espesor) sobre la base de información incompleta. Lo que ellos pueden hacer con los datos limitados con que cuentan, sin embargo, es trazar una curva de distribución, es decir, una curva que describe la probabilidad de que ocurra un valor determinado, para cada variable ingresada en el cálculo.

Por ejemplo, si los valores de porosidades posibles para la arenisca oscilan por lo general entre 10% y 35%, la curva de distribución que relaciona la probabilidad (eje vertical), con el valor de porosidad (eje horizontal), describiría la probabilidad de que ocurra cada valor de porosidad.

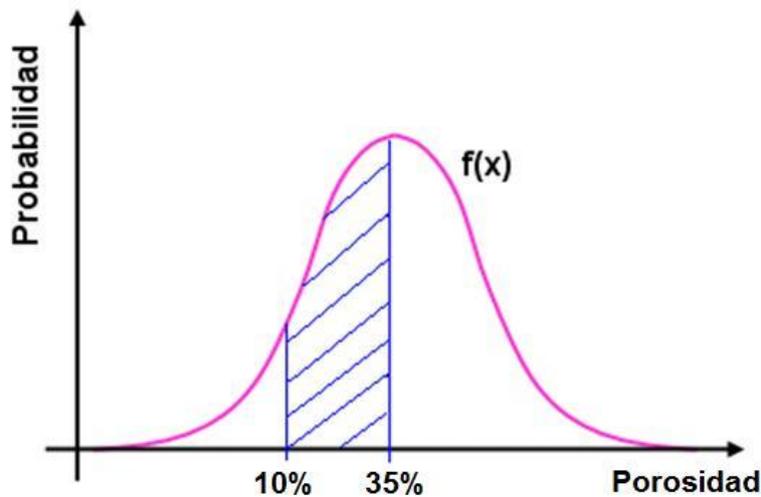


Figura 9: Distribución de probabilidad para la porosidad

Se pueden trazar curvas de distribución similares para todos los otros datos. En una simulación de Monte Carlo, cada uno de estos datos se muestrea en forma arbitraria y los valores individuales se multiplican entre sí (procedimiento conocido como una "prueba"). El resultado de una prueba individual proporciona una respuesta posible para las reservas recuperables. Este muestreo arbitrario de cada distribución de datos ingresados se repite muchas veces, la simulación tomará los resultados más posibles de cada distribución, en lugar de los extremos, porque existen más ejemplos dentro de ese rango. Como resultado final se obtiene una nueva curva de distribución, que representa un rango de posibles cantidades de reservas recuperables y la probabilidad de que ocurra algún valor en particular.

En un mundo ideal, las curvas de distribución individual se deberían basar en muchas mediciones. Pero, en la práctica, a menudo existe un número limitado de datos disponibles. Por ello es indispensable la experiencia y el criterio de quienes están realizando la simulación para que la curva que concuerde con la limitada cantidad de datos disponibles.

La simulación de Monte Carlo es un método que puede ayudar en la toma de decisiones económicas, o para evaluar riesgos políticos o de seguridad, en este caso, las variables serán los precios del petróleo, los costos, las tasas de interés y cualquier otro factor financiero. Lo más importante para que funcione con éxito, es la asignación de los datos ingresados así como la variación que puedan tener estos.

## Capítulo 3 Teoría de las Opciones Reales

A diferencia de las técnicas tradicionales, como el análisis del flujo de fondos descontado (DCF), la técnica de Opciones Reales asume que el mundo está en un constante cambio, la incertidumbre y las interacciones competitivas entre las compañías son factores que determinan el crecimiento de una empresa, así como el éxito de un proyecto.

Una de las cuestiones a considerar, es que esta técnica considera (como ocurre en el mundo real) que las compañías tienen la oportunidad de adaptar y revisar las decisiones futuras en respuesta a los cambios de las circunstancias en torno a un proyecto. El futuro es un panorama lleno de alternativas y opciones que pueden agregar valor al proyecto, dependiendo si es aprovechada o no cada opción.

En este caso, el uso de la palabra **opción**, implica valor agregado, ya que el simple hecho de poseer una opción, tiene valor, independientemente de que se ejerza o no.

### 3.1 Opciones Financieras y opciones reales

El análisis de las opciones reales se inspira en la teoría de las opciones financieras, es por ello que es necesario abordar primero las opciones financieras.

#### 3.1.1 Opciones financieras

Una opción financiera es el derecho, pero no la obligación, de comprar o vender una acción en una fecha determinada (o a veces antes, dependiendo del tipo de opción que se trate), a un precio preestablecido. Dicho precio al cual se puede comprar o vender una acción, se conoce como precio de ejercicio. Es decir, las opciones representan derechos que tienen sus poseedores a realizar una transacción, en contrapartida a obligaciones, con respecto a un activo.

Las dos clases principales de opciones son:

- **Compra (calls):** el derecho, pero no la obligación, de comprar acciones al precio de ejercicio de la opción dentro de un determinado período.

- **Venta (puts):** el derecho, pero no la obligación, de vender acciones al precio de ejercicio de la opción dentro de un determinado período.

En las opciones de compra, el comprador adquiere, mediante un cierto pago, el derecho a comprar un determinado activo a un precio previamente acordado. Al término del periodo estipulado en el contrato, esta compra es llevada a cabo si el precio corriente de mercado del activo es mayor al precio por el cual se pactó la compra, de manera de obtener una ganancia. Caso contrario, la compra no se realizará porque es preferible comprar el activo en el mercado (porque su es precio menor).

En la opción de venta, el comprador adquiere mediante un cierto pago, el derecho a vender un determinado activo a un precio previamente acordado en el término estipulado, esta venta será llevada a cabo si el precio de mercado es menor al precio del contrato (para obtener una ganancia). De no ser así, siempre conviene vender el activo al precio de mercado.

Vamos a mencionar un ejemplo:

Monsters, Inc., tiene un precio por acción de \$1000

Un inversionista puede adquirir una opción de compra con un precio de ejercicio de \$1100.

Si tiempo después, el precio de la acción sube a \$1200, el tomador de opciones (inversionista) puede ejercer la opción de comprar las acciones por el precio de ejercicio acordado de \$1100, para venderlas en el mercado a \$1200, obteniendo una ganancia de \$100 por acción, menos el arancel por la compra de la opción.

Alternativamente, si el inversionista tiene una opción de venta con un precio de ejercicio de \$900 y las acciones de Monsters, Inc. caen por debajo de los \$900, el tomador de opciones puede obtener beneficios comprando acciones en el mercado libre al precio mas bajo y ejerciendo la opción de venderlas a \$900.

Ambos ejemplos ignoran los aranceles de transacción que se pagan habitualmente a los agentes bursátiles.

El tomador de opciones tiene el derecho pero no la obligación de comprar la acción al precio de ejercicio de la opción. El inversionista deja que la opción caduque si el ejercicio de su derecho no le resulta beneficioso.

Las opciones financieras a su vez pueden subdividirse en varias clases.

- Opción europea: puede ejercerse **solamente** en la fecha de vencimiento especificada en el contrato de opciones.
- Opción americana puede ejecutarse **en cualquier momento**, incluso en la fecha de vencimiento.

### 3.1.2 Opciones reales

Trigeorgis (1996) nos da la siguiente definición: “*similar a las opciones financieras, las opciones reales implican las decisiones flexibles o derechos – sin obligación – para adquirir o cambiar una alternativa de inversión*”.

Realizando una analogía con una opción financiera: una opción real es el derecho, pero no la obligación, de adoptar una acción que afecta a un activo físico real, a un costo determinado, durante un lapso de tiempo predeterminado (la duración de la opción). Aunque las opciones reales y financieras tienen semejanzas, la analogía no es exacta.

La técnica de las Opciones Reales, permite evaluar las opciones para agregar valor a los proyectos, siendo así una herramienta para reconocer y actuar ante nuevas oportunidades con el objetivo de aumentar las ganancias o mitigar las pérdidas.

En las opciones reales, la decisión de invertir o no, constituye la primera de una cadena de subsiguientes decisiones y acciones que dirigen y moldean, en la medida de lo posible, los resultados del proyecto.

El concepto de opciones reales está basado en el hecho de que la empresa tiene la flexibilidad de alterar las decisiones tan pronto como la información esté disponible. Si las condiciones futuras son favorables, un proyecto puede ser expandido para tomar ventaja de estas condiciones. Si las condiciones no son favorables, un proyecto puede ser reducido, interrumpido temporalmente o abandonado.

Vamos a aterrizar estos conceptos a la industria petrolera, por ejemplo:

Una empresa petrolera, adquiere la concesión de explotar cierta área. Esto es análogo a una opción de compra en la que se adquiere el derecho, pero no la obligación, de explotar el yacimiento al precio de ejercicio de la opción dentro de un determinado período.

Las etapas de exploración, desarrollo y producción de un campo petrolero son una serie de opciones reales vinculadas. En la primera etapa, la compañía tiene la opción de invertir dinero en exploración y recibir a cambio, recursos prospectivos de petróleo y gas. Esta es una opción similar a la opción sobre acciones, en la que el dueño de la opción, tiene el derecho, pero no la obligación, de pagar el precio de ejercicio de ese derecho y recibir las acciones. El dinero invertido en la sísmica y en perforación exploratoria es análogo al precio de ejercicio de la opción; los recursos descubiertos son análogos a las acciones. Una opción de exploración vence el día en que caduca la concesión.

Después de ejercer la opción explorar, tiene la opción de ejercer una segunda opción: la de desarrollar el campo petrolero, es decir, tiene el derecho, pero no la obligación, de desarrollar los recursos descubiertos en cualquier momento hasta la fecha de vencimiento de la concesión por el monto de dinero establecido por el costo de desarrollo del campo. Si la compañía ejerce la opción de desarrollo, obtiene recursos de hidrocarburos.

La opción final es la opción de producción. La compañía tiene ahora el derecho, pero no la obligación, de invertir dinero en la extracción del petróleo y el gas del subsuelo para su envío al mercado. En el caso real, es necesario resolver la incertidumbre, conocer probabilidades de que el precio del petróleo haga rentable su producción.

Esta serie de opciones se llaman opciones secuenciales o compuestas ya que cada opción depende del previo ejercicio de otra. Al ir desarrollando las opciones la compañía obtiene información para determinar si el proyecto ha de pasar a la etapa siguiente, es decir que el proyecto es dinámico, y va cambiando conforme al paso del tiempo, si el estudio se realizara mediante otras herramientas, no se tendría la posibilidad de cambiar los escenarios, en este caso, la empresa puede en todo momento tomar la decisión que mayor valor le agregue al proyecto.

3.1.3. Opciones reales vs opciones financieras

Opción financiera	Variable	Opción Real	Opción Real aplicado a la industria petrolera
Precio de la acción	$S$	Valor Presente Neto del Proyecto	Valor Presente Neto de las reservas de hidrocarburos desarrolladas
Precio de ejercicio de la opción	$X$	Inversión requerida para realizar el proyecto	Valor presente de la Inversión requerida para el desarrollo del proyecto
Tiempo hasta el vencimiento de la opción	$T$	Tiempo hasta el vencimiento de la opción	Tiempo remanente de la concesión
Tasa de interés libre de riesgo	$rf$	Tasa de interés libre de riesgo	Tasa de interés libre de riesgo
Volatilidad del precio de las acciones	$\sigma$	Volatilidad del precio de las acciones	Volatilidad de los ingresos provenientes de las reservas de hidrocarburos
Dividendos no cobrados	$\delta$	Dividendos no cobrados	Ingresos o ganancias no percibidos

En la tabla superior, se muestra una comparación de los parámetros utilizados en las opciones financieras, realizando la analogía con las opciones reales, así como las variables aplicando la metodología a la industria petrolera.

- Una opción de desarrollo de reservas petroleras, es similar a una opción de compra financiera. El VPN de las reservas de hidrocarburos desarrolladas es similar al precio de las acciones subyacentes,  $S$ , en una opción financiera.
- El VPN de las erogaciones necesarias para desarrollar las reservas se asemeja al precio de ejercicio de una opción financiera,  $X$ .

- El tiempo que dura la concesión del proyecto de exploración y producción es equivalente al plazo transcurrido hasta el vencimiento de una opción financiera,  $T$ .
- La tasa de retorno libre de riesgo, es idéntica para las opciones financieras y para las opciones reales, ya que el dinero, de no ser utilizado en el proyecto, se considera que genera un interés al estar invertida en un banco a una tasa en la que no existe riesgo.
- La volatilidad de los flujos de fondos de un proyecto de E&P, así como las incertidumbres asociadas con el precio y a la producción de los hidrocarburos, es análoga a la volatilidad de los precios de las acciones,  $\sigma$ .
- Las ganancias no percibidas a causa de la producción diferida, se asemejan a los dividendos no cobrados de la opción financiera,  $\delta$ .

Las analogías entre las opciones reales y las opciones financieras no son exactas. Una diferencia clave entre las dos clases de opciones es que el precio de ejercicio de una opción financiera normalmente es fijo. Para una opción real, el precio está asociado con los costos de desarrollo del proyecto, por lo tanto es volátil, es decir, fluctúa con las condiciones propias del mercado, los precios de las compañías de servicios, la disponibilidad de equipos de perforación, etc.

En la industria de E&P, la volatilidad comprende los precios del petróleo y el ritmo de producción. La determinación de la volatilidad de las opciones reales es compleja y por ende es el principal problema de la aplicación del método en esta industria.

## 3.2 Tipos de opciones reales

Las opciones reales se clasifican por el tipo de flexibilidad que otorgan. Las opciones pueden existir naturalmente o pueden incorporarse en un proyecto. La compañía puede: diferir la inversión, crecer o decrecer un proyecto, abandonar el proyecto para la recuperación o cambiarlo por otro plan. También se pueden crear opciones compuestas

### 3.2.1 Opción de Crecimiento

Las opciones de crecimiento son las oportunidades de inversión adicionales que van surgiendo durante la vida del proyecto. Estas oportunidades pueden ser de diversos tipos: aumentar la capacidad de producción, introducir nuevos productos, adquirir otras empresas e incrementar presupuestos en investigación y programas de desarrollo.

La ventaja clave de utilizar la perspectiva de las opciones de crecimiento es que integra el presupuesto de fondos para inversiones con la planificación estratégica a largo plazo. Las decisiones de inversión en el presente, son la base para las decisiones a futuro, las asignaciones de fondos en cualquier momento de la vida del proyecto repercutirá para el logro o el fracaso de los objetivos estratégicos.

La opción de crecimiento maneja además la posibilidad de realizar inversiones adicionales si las cosas funcionan bien en la primera inversión. La opción de ampliar la producción o la escala operativa de un proyecto si las condiciones son favorables, o disminuirla si son desfavorables, es una opción real equivalente a una opción de compra americana. Este tipo de inversiones adicionales de seguimiento cuando las condiciones son favorables cambian, el valor que tiene un proyecto, ya que el proyecto con estas nuevas opciones vale más que el mismo proyecto sin esa posibilidad.

La empresa puede optar por modificar el ritmo de producción, por ejemplo en un campo de petróleo o gas, se puede disponer de la opción de aumentar la producción invirtiendo en un plan de recuperación mejorada o perforando pozos adicionales.

En la opción de crecimiento es muy importante considerar el momento en que se realizará, ya que podemos encontrar un exceso de capacidad cuando aún no es necesario, o al no hacerlo, correr el riesgo de no poder atender un aumento de la demanda y por ende no aprovecharíamos una importante oportunidad del mercado.

La opción de crecimiento plantea un escenario en el que los precios, u otras condiciones del mercado, son más favorables que lo inicialmente esperado, es por ello que la empresa puede acelerar sus planes de expansión.

Ampliar la escala productiva puede brindarle a la compañía la posibilidad de capitalización de futuras oportunidades de crecimiento. Esta opción, será ejercida cuando el comportamiento futuro del mercado sea más favorable.

Gracias a este tipo de opción, es posible que mientras un proyecto que fue evaluado mediante el análisis convencional de Flujos Descontados no fue favorable, ahora tenga un valor positivo.

Las opciones reales, evalúan las oportunidades para una expansión posterior y, por ello, representan un valor estratégico. Son opciones secuenciales que enlazan distintas fases de crecimiento y expansión al mismo tiempo que preservan la flexibilidad directiva para proceder con la fase siguiente dependiendo de las condiciones imperantes del mercado.

Hay tres casos en los que el análisis de opciones reales es realmente útil para analizar opciones de crecimiento:

1. *Adquisiciones de tipo estratégico.* En este caso la empresa considera que la adquisición de cierto activo, le proporcionará una ventaja competitiva en el futuro, por ejemplo, la compra de tecnología.
2. *Investigación y desarrollo:* Por medio de opciones reales podemos valorar el beneficio que nos otorgaría el desarrollo de cierta tecnología, así como otorgarle el valor a los posibles beneficios que nos otorgaría una determinada investigación.
3. *Proyectos multietapa.* Cuando se opta por un esquema de proyectos multietapa, la empresa reduce su potencial de crecimiento sin embargo se reduce el riesgo de mayores pérdidas, permitiendo ante cada etapa juzgar la demanda y decidir si se continua o se abandona.

### **3.2.2. Opción de Espera**

La oportunidad de invertir en algún momento futuro puede ser más valiosa que una oportunidad de invertir en forma inmediata. La opción de espera brinda la posibilidad de esperar hasta que

las condiciones del mercado se vuelvan más favorables o abandonar un proyecto si dichas condiciones se deterioran.

Una concesión para exploración y producción, por ejemplo, puede permitir que una compañía petrolera espere hasta que se resuelvan las incertidumbres existentes en torno a los precios del petróleo y del gas y acerca de la tecnología de desarrollo. La compañía solo invertiría en exploración y desarrollo si el precio del petróleo alcanzara un nivel suficiente para asegurar la rentabilidad de la concesión. Si los precios declinaran, la compañía dejaría caducar la concesión. El precio de ejercicio de la opción es el dinero requerido para desarrollar el área.

Esta opción, refleja la flexibilidad para esperar a tomar una decisión de inversión hasta que las circunstancias la hagan aconsejable. Actuando bajo un alto grado de incertidumbre, invertir apuradamente es más bien como realizar una apuesta, en cambio si es posible esperar y ver cómo se desarrolla la incertidumbre, se podrá evitar por ejemplo invertir en escenarios no benéficos. Cuando no se tiene la certeza, es preferible mantener la opción de inversión abierta cierto tiempo para evaluar cómo evolucionan las diferentes variables.

Sin embargo, esperar tiene costos potenciales, por ejemplo, no aprovechar la oportunidad mientras otra compañía puede hacerlo. Por ello es necesario realizar un balance entre el beneficio de la espera y el costo por las pérdidas de tener un activo sin aprovechar.

La opción de diferir un proyecto de inversión proporciona el derecho a posponer la realización de dicho proyecto durante un plazo de tiempo determinado.

Esta opción es más valiosa en proyectos donde una empresa tiene derechos exclusivos para invertir en un proyecto pero va perdiendo valor conforme las barreras de entrada desaparezcan, es decir que si cualquier empresa puede realizar un proyecto similar al mismo tiempo, el valor de la espera carece de sentido, en cambio si es una oportunidad exclusiva la espera de la empresa adquiera mayor valor.

Debido a que la realización anticipada del proyecto implica renunciar a la opción esperar, el valor de ésta última actúa como un costo de oportunidad, la ejecución del proyecto se realizará, hasta que el VPN sea mayor que la inversión inicial y que la opción de esperar.

### 3.2.3. Opción de abandono

Esta opción proporciona a su propietario el derecho a vender, liquidar, cerrar un proyecto determinado a cambio de un precio, es la posibilidad de liquidar un proyecto en cualquier momento por un valor de venta superior a lo que se esperaría obtener si se continúa con su explotación. La razón económica del abandono es la misma que la de la inversión. Se debe “desinvertir” cuando el proyecto no se justifica económicamente. Cuando un proyecto ya no es rentable, la empresa aminorará sus pérdidas y abandonará el proyecto.

Es una opción similar a una opción de venta, de tipo americano, con un precio de ejercicio igual al valor de venta del proyecto. Sin embargo, no es una opción de venta sencilla: el proyecto tiene un valor incierto complicando la forma de solución.

El valor total de un proyecto debe considerar su valor de abandono, en general, no se conoce en el momento de su evaluación inicial, depende de su evolución en el futuro. Sin embargo, el valor de la opción de abandono es fundamental en la evaluación continua de un proyecto, una vez que ha sido emprendido. La decisión de continuar o vender (abandonar) en algún momento futuro de la vida del proyecto (momento óptimo de abandono) depende de la situación en que se encuentre en cada período.

Existen dos importantes cuestiones a considerar en el análisis del valor de abandono:

1. La necesidad de tenerlo en cuenta, de alguna forma, en la decisión de inversión.
2. La determinación del momento o intervalo de tiempo en el que dicho valor de abandono alcanza su máximo valor. Dicho momento óptimo no es conocido cuando se emprende el proyecto, dependerá de la propia evolución del mismo

Un proyecto que pueda ser liquidado vale más que el mismo proyecto sin la posibilidad de abandono.

Generar cláusulas de escape al momento de realizar el proyecto, nos permite construir opciones de abandono, pues nos brinda la flexibilidad operativa necesaria en caso de decidir abandonar el proyecto. Para ejemplificar dichas cláusulas podemos mencionar los contratos con proveedores

firmados por un periodo temporal y no a largo plazo; empleados contratados mediante contratos temporales en lugar de indefinidos.

Además es recomendable que una nueva empresa que se enfrenta a una gran incertidumbre es mejor construirla por etapas, manteniendo siempre la opción de abandonar el proyecto en cuanto consideren que su futuro es contraproducente, de hecho, la principal razón de racionar el dinero invertido a través del reparto por etapas es precisamente el mantenimiento de la opción de abandono.

Para el caso de una empresa petrolera si los precios del petróleo y del gas entran en un periodo de declinación prolongado, la empresa podrá optar por abandonar el proyecto y por ejemplo vender su equipo. Como alternativa, podrá vender el proyecto o su participación en el mismo a otra compañía.

Evidentemente, hay un costo en la creación de flexibilidad pero los beneficios pueden ser grandes en los negocios de mayor riesgo. Además la existencia de una valiosa opción de abandono aumenta el deseo de invertir en un proyecto (lo mismo que una valiosa opción de reinvertir reduce las intenciones de abandonar). Por ello, la opción de abandono tiene un efecto económico sobre las decisiones y por lo general, no debe valorarse aisladamente.

El valor de la opción de abandono aumenta:

- ❖ Cuanto mayor sea la incertidumbre sobre el valor futuro del negocio.
- ❖ Cuanto mayor sea la cantidad de tiempo de que se dispone para ejercer dicha opción.
- ❖ Cuanto mayor sea la relación entre el valor de abandono del proyecto (su valor de liquidación) contra su valor residual (valor actual de los flujos de caja libres restantes).

### **3.3 Métodos de Evaluación**

Las opciones reales se evalúan utilizando técnicas de fijación de precios de opciones financieras. No obstante, la valoración de las opciones reales puede ser extremadamente compleja, ya que cualquier técnica de opciones financieras que se adopte, solo proporcionara una valoración aproximada.

En la presente tesis analizaremos los dos enfoques más utilizados: la formula de Black-Scholes (una solución cerrada) y los reticulados binomiales.

### 3.3.1 Modelo Binomial

El modelo binomial es un modelo discreto que considera que la evolución de precio del activo subyacente ( $S$ ) varía según el proceso binomial multiplicativo. Es decir, sólo puede tomar dos valores posibles:

- al alza ( $S_u$ )
- a la baja ( $S_d$ )

Cada uno con probabilidades asociadas “ $p$ ” y “ $(1-p)$ ” como lo podemos ver en la siguiente figura:

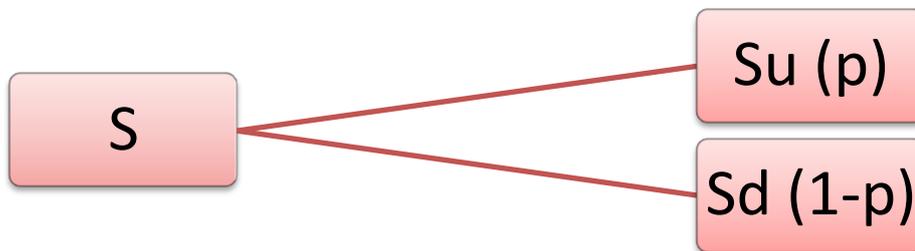


Figura 10: Modelo binomial

De esta forma, extendiendo esta distribución de probabilidades a lo largo de un número determinado de períodos se consigue determinar el valor teórico de una opción, que puede ser tanto de tipo europeo como americano.

Los supuestos básicos de este modelo son los siguientes:

- Mercado financiero perfecto, es decir competitivo y eficiente.
- No hay costos de transacción, de información e impuestos.
- Posibilidad de comprar o vender sin limitación alguna.
- Existencia de una tasa de interés sin riesgo a corto plazo ( $r_f$ ="Risk Free") conocida, positiva y constante para el período considerado. Esta tasa implica la posibilidad de prestar o tomar prestado al mismo tipo de interés ( $r_f$ ).
- Las transacciones se pueden realizar de manera simultánea y los activos son perfectamente divisibles.
- La acción o activo subyacente no paga dividendos, ni cualquier otro tipo de reparto de beneficios, durante el período considerado.
- El precio del activo subyacente evoluciona según un proceso binomial multiplicativo a lo largo de períodos discretos de tiempo.

Un reticulado es una forma de demostrar cómo cambia el valor de un activo con el tiempo, dado que el activo tiene una volatilidad particular.

Un reticulado binomial tiene solo dos posibles caminos en cada incremento de tiempo, ya sea hacia arriba o hacia abajo. Siempre es similar a un abanico puesto de costado.

Dentro de las opciones reales es posible tener dos diferentes tipos de reticulados: el reticulado del activo subyacente y el reticulado de valoración.

### 3.3.1.1 Reticulado del activo subyacente

Este tipo de reticulado, como en el que se muestra en la siguiente figura, se lee de izquierda a derecha e indica cómo pueden evolucionar los valores futuros del activo. El valor del nodo izquierdo extremo es el VPN del activo subyacente, calculado a partir del modelo DCF.

En cada intervalo de tiempo, el valor del activo aumenta en un factor multiplicativo  $u$  (mayor que 1), o disminuye en un factor multiplicativo  $d$  (entre 0 y 1), representado como un incremento de tiempo hacia arriba o un incremento de tiempo hacia abajo en el reticulado. Los factores  $u$  y  $d$ , que determinan los movimientos ascendentes y descendentes en cada nodo, son funciones de la volatilidad del activo subyacente y del tiempo que media entre los periodos en consideración. Los nodos de la derecha del reticulado representan la distribución de los posibles valores futuros del activo.

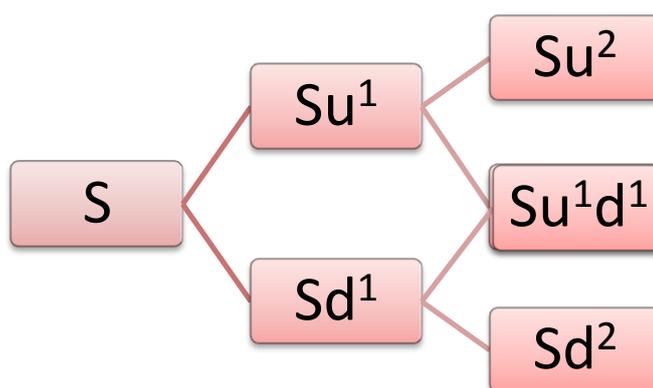


Figura 11: Reticulado del activo subyacente de 3 periodos

donde:

$S$  = precio del activo subyacente

$S_u$  = precio del activo subyacente al alza

$S_d$  = precio del activo subyacente a la baja

Vamos a ver la construcción de un reticulado, así como las formulas necesarias para el cálculo.

Primero vamos a suponer que el valor actual de una acción ( $S$ ) es de 100, y que dentro de un periodo de tiempo, la acción puede tomar un valor  $S_u$  de 125 o un valor  $S_d$  de 80. Por ahora la probabilidad de que ocurra uno u otro resultado no la tomaremos en cuenta, solo los posibles resultados. Esto lo podemos visualizar en la siguiente figura:

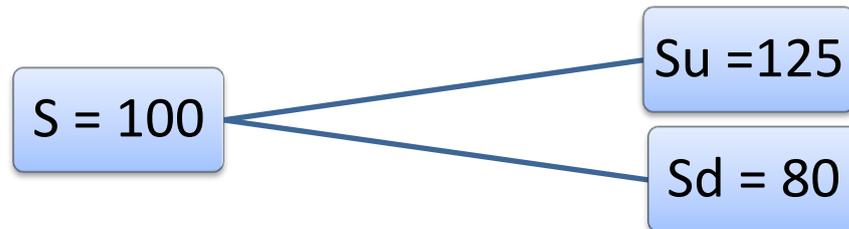


Figura 12: posibles valores del activo

Si adquirimos por un costo  $C$  una opción de compra europea sobre dicha acción con vencimiento dentro de un periodo de tiempo, y un precio de ejercicio de 100, sabemos que dentro de un periodo esta opción podrá valer 25 ( $C_u$ ) si la acción alcanza el valor de 125 o 0 si la acción desciende de precio ( $C_d$ ), (el valor es 0 puesto que no consideramos hacer efectiva la opción si el valor es negativo)

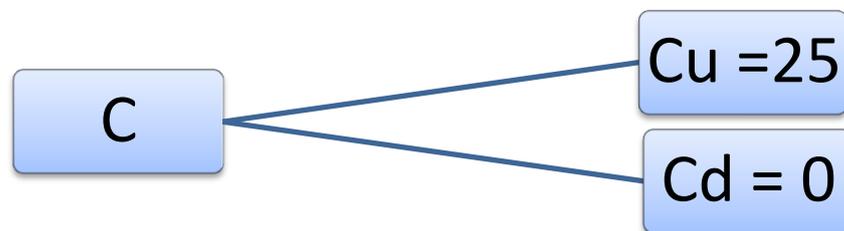


Figura 13: Posibles valores de la opción

Para valorar la acción, vamos a suponer un activo financiero que genere exactamente los mismos flujos de caja que el activo a valorar. La cartera que utilizaremos se compone de:

- $H$  = # de acciones
- $B$  = prestamo que hemos contraido a una tasa de interes  $r_f$
- $r_f$ =tasa de interes libre de riesgo (risk free)

el valor de la cartera seria =  $100H - B$

despues de un periodo de flujos, la cartera puede tomar dos diferentes valores:

- $S_u = 125 \longrightarrow 125H - (1 + rf)B = 20$
- $S_u = 80 \longrightarrow 80H - (1 + rf)B = 0$

Restando ambas ecuaciones, y despejando H, tenemos que  $H = 0.444$

Si la tasa de interes libre de riesgo  $rf = 5\%$ , podemos obtener el valor de B

$$B = 33.862$$

Con estos datos podemos conocer el valor de la opcion de compra:

$$C = 100H - B \qquad C = 100(0.444) - 33.862 \qquad C = 10.582$$

Para obtener la expresion general primero consideraremos estas dos expresiones:

- $C_u = S_uH - (1 + rf)B$
- $C_d = S_dH - (1 + rf)B$

Donde

- S es el precio de la acción.
- $S_u$  es el precio de la acción al alza
- $S_d$  es el precio de la acción a la baja
- u es el coeficiente por el que multiplicamos S para obtener  $S_u$ , para el ejemplo  $u = 1.25$
- d es el coeficiente por el que multiplicamos S para obtener  $S_d$ , para el ejemplo  $d = 0.8$

Si restamos una ecuación de la otra, y despejamos H, obtendremos:

$$H = \frac{C_u - C_d}{S(u - d)}$$

Despejando B de alguna de las dos ecuaciones anteriores:

$$B = \frac{S_uH - C_u}{1 + rf}$$

Y al sustituir el valor de  $C = SH - B$ , reacomodado:

$$HS - \frac{SuH - Cu}{1 + rf} = C$$

$$HS + HSrf - SuH + Cu = C(1 + rf)$$

$$HS(1 + rf - u) + Cu = C(1 + rf)$$

Sustituyendo H por su valor y eliminando S del denominador y del numerador:

$$\frac{Cu - Cd}{u - d} (1 + rf - u) + Cu = C(1 + rf)$$

Ahora si es necesario considerar el valor de la probabilidad que habíamos dejado de lado en un principio del ejercicio. Para esto vamos a considerar:

$$p = \frac{1 + rf - d}{u - d}$$

$$1 - p = \frac{u - (1 + rf)}{u - d}$$

Estos valores representan la probabilidad implícita, es decir la probabilidad neutral al riesgo, esta no tiene nada que ver con la mayor o menor aversión que tenga el inversor frente al riesgo.

P es la probabilidad de ascenso, y  $1 - p$  la probabilidad de descenso del valor de la acción, sustituyendo con los valores del ejercicio:

$$p = \frac{1 + 0.05 - 0.8}{1.25 - 0.8} = 55.6 \% \text{ de que ascienda}$$

$$1 - p = \frac{1.25 - (1 + 0.05)}{1.25 - 0.8} = 44.4 \% \text{ de que descienda}$$

Retomando la demostración, sustituiremos el valor de  $p-1$ :

$$Cu + (Cu - Cd)(p - 1) = C(1 + rf)$$

Despejando  $C$ , obtendremos la expresión que calcula el valor de la opción, tanto si el valor de dicha acción asciende o desciende:

$$C = \frac{Cu p + Cd(1 - p)}{1 + rf}$$

Para concluir, el valor de la opción para nuestro ejemplo sería:

$$C = \frac{25 * 0.5 + 0(1 - 0.5)}{1 + 0.05} = 11.904$$

Ahora tendremos que pasar de la binomial a la distribución normal logarítmica.

En el proceso de cálculo multiplicativo del modelo binomial, suponemos que el factor de descenso  $d$  es inverso del factor de ascenso  $u$ .

$$d = \frac{1}{u}$$

Para que esto suceda, deberemos medir el rendimiento a través del logaritmo de la relación entre el precio en un momento determinado ( $S_t$ ) y del momento precedente ( $S_{t-1}$ ).

Esto es así, debido a que si, por ejemplo, el precio de una acción durante tres instantes de tiempo consecutivos vale 100, 120 y 100 respectivamente, sus rendimientos serán del 20% (es decir,  $20 \div 100$ ) y del -16,66% (es decir,  $20 \div 120$ ), como se observa el valor absoluto de ambas cantidades no es simétrico aunque el ascenso y descenso sea exactamente el mismo, lo que cambia es la base sobre la que se calcula dicha variación.

Sin embargo, si aplicamos el cálculo logarítmico obtendremos unos rendimientos de:  $\ln(120 \div 100) = 18,23\%$  y  $\ln(100 \div 120) = -18,23\%$ , lo que sí los hace simétricos.

Por lo tanto, los precios que se distribuyen según una normal logarítmica tendrán unos rendimientos distribuidos normalmente, que serán calculados según la expresión:

$$rt = \ln\left(\frac{S_t}{S_{t-1}}\right)$$

En la figura se muestra la construcción de un reticulado del activo subyacente. El valor del activo hoy, tal como el precio de una acción, se ubica en el nodo del extremo izquierdo.

En cada incremento de tiempo, el valor puede aumentar un factor multiplicativo  $u$  o disminuir un factor multiplicativo  $d$ , esto para cada periodo, generando un reticulado expandido como el de la figura. *(Ver página siguiente)*

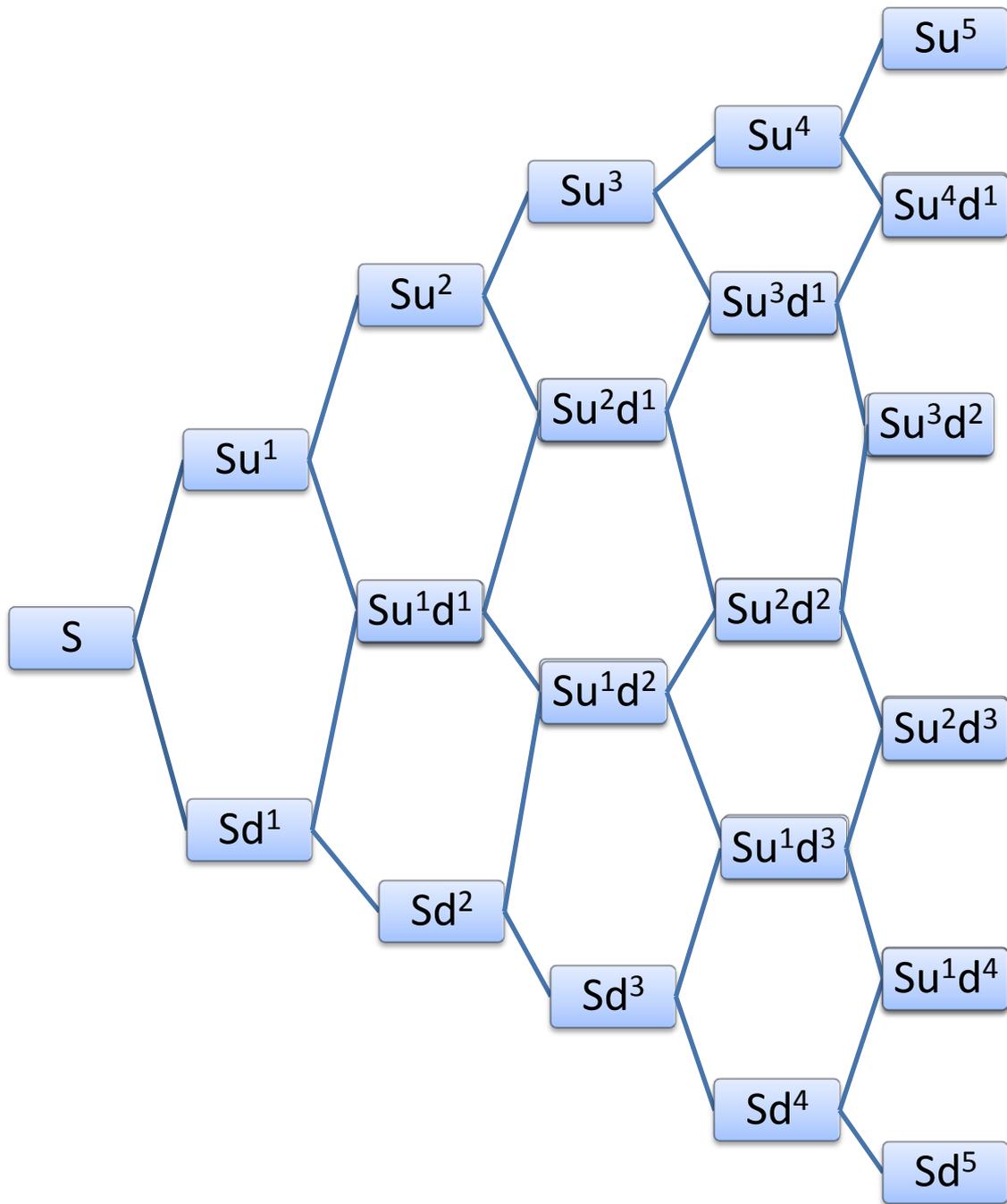


Figura 14: Reticulado expandido de 5 periodos

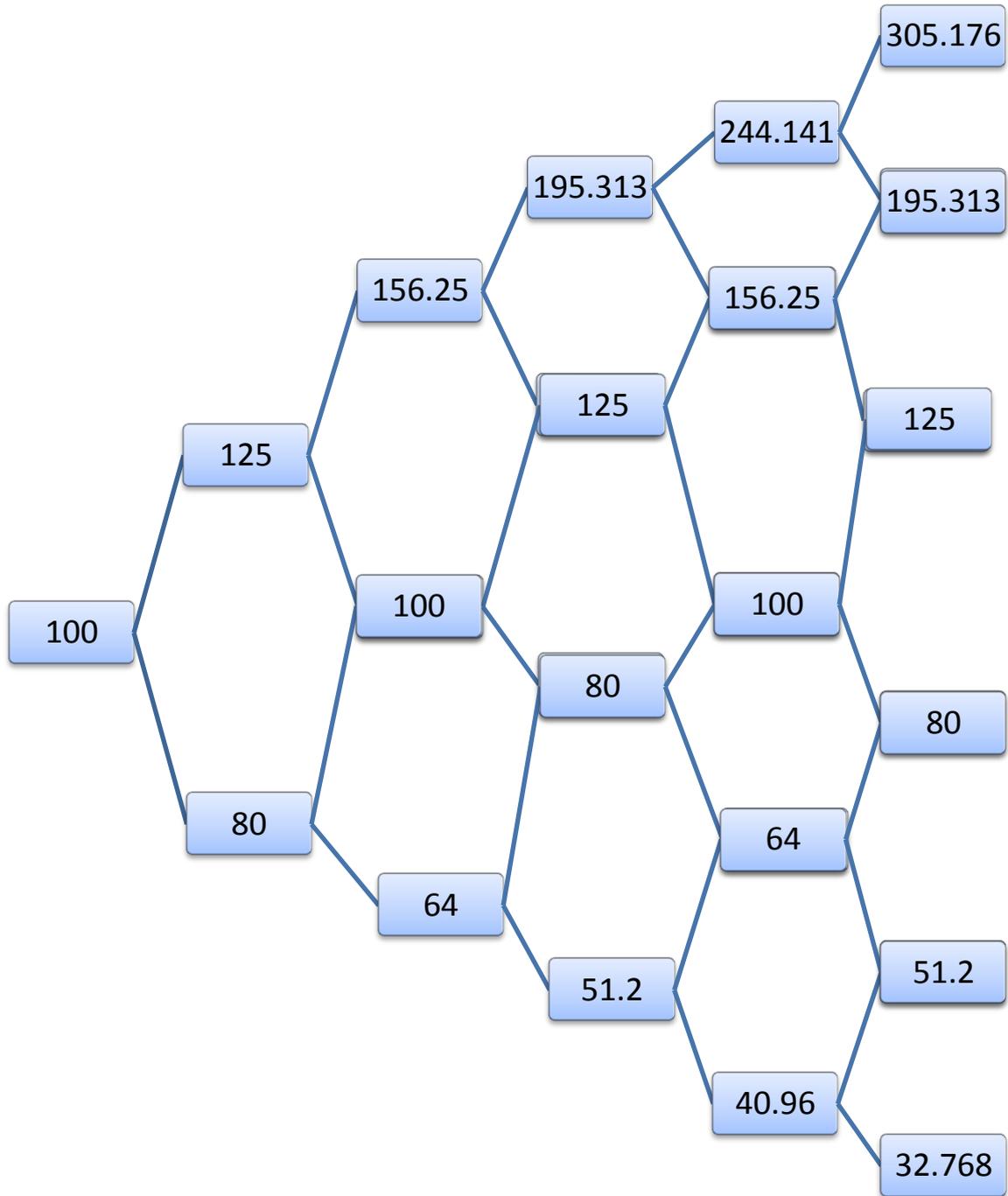


Figura 15: Ejemplo del reticulado expandido de 5 periodos

En esta figura se muestra un ejemplo de un reticulado del activo subyacente, al cual también le podremos llamar árbol binomial. Para este caso, retomando los valores utilizados anteriormente,  $u = 1.2$  y  $d = 0.8$ , el árbol se extiende a lo largo de 5 periodos y comienza con valor de la acción de 100.

En este tipo de análisis, se supone que la varianza de los rendimientos es constante para cada periodo, de no ser así, los coeficientes  $u$  y  $d$  tendrían que estar cambiando. La varianza del periodo es  $\sigma^2$ , la varianza para  $t$  años será  $\sigma^2 t$ . Mientras que la desviación típica será  $\sigma\sqrt{t}$  a la que se le suele denominar **volatilidad** del activo.

Si  $\sigma$  es la desviación típica de los rendimientos por periodo,  $t$  el número de años hasta el vencimiento y  $n$  el número de periodos en los que subdividimos  $t$ , el proceso binomial para el activo proporciona unos rendimientos normalmente distribuidos de la siguiente forma:

$$u = e^{\sigma\sqrt{t/n}}$$

$$d = \frac{1}{u} = e^{-\sigma\sqrt{t/n}}$$

Por ejemplo si  $S = 250$ ,  $\sigma = 20\%$ ,  $t=10$  años,  $rf = 8\%$   $n=1$

$$u = e^{0.2\sqrt{10/1}} = 1.882 \quad y \quad d = 0.531$$

Complementándolo con las ecuaciones antes vistas

$$p = \frac{1 + rf - d}{u - d} = \frac{1 + 0.08 - 0.531}{1.882 - 0.531} = 0.406$$

Lo más difícil de la construcción del reticulado del activo subyacente es la estimación de la volatilidad. Este valor debe reflejar las incertidumbres, tanto económicas como técnicas, asociadas con el valor del activo subyacente y la forma en que estas incertidumbres evolucionan con el tiempo.

Los métodos de estimación de la volatilidad no son triviales y su análisis trasciende el alcance de esta tesis.

### 3.3.1.2 Reticulado de valoración

El reticulado de valoración tiene exactamente la misma cantidad de nodos y ramificaciones que el del activo subyacente. Sin embargo este se trabaja hacia atrás, es decir desde los valores de los nodos terminales de la derecha hacia la izquierda del reticulado.

El valor colocado en cada nodo terminal es el máximo entre cero y la diferencia entre el valor  $S$  y el precio de ejercicio  $X$ ,  $MAX(S - X, 0)$ . Los valores negativos son desechados, ya que se tiene el derecho de negarse a ejercer una opción con valor negativo.

A partir de estos valores iniciales en los nodos terminales, es posible trabajar hacia atrás a través del reticulado—utilizando un proceso denominado inducción inversa—para obtener un valor de la opción en el nodo izquierdo extremo del reticulado. La inducción inversa se basa en un factor  $p$ , la probabilidad neutral con respecto al riesgo, de un movimiento en el precio del activo subyacente. Se trata de una probabilidad idealizada, ya que considera un mundo en el que los inversionistas son indiferentes al riesgo.

La aplicación de este concepto a cada uno de los pares de nodos verticalmente adyacentes del reticulado proporciona el valor de la opción real en el nodo izquierdo extremo del reticulado.

En la figura (*Bailey, 2004*), nos muestra la construcción de un reticulado de valoración, el valor del activo, al igual que el precio de las acciones  $S$ , en la fecha de vencimiento se toma del reticulado del activo subyacente. El costo de ejercicio de la opción,  $X$ , es conocido por anticipado.

Los nodos de la última columna contienen la diferencia entre el precio de las acciones y el precio de ejercicio de la opción, es decir  $(S - X, 0)$  o 0 si el valor resultara negativo.

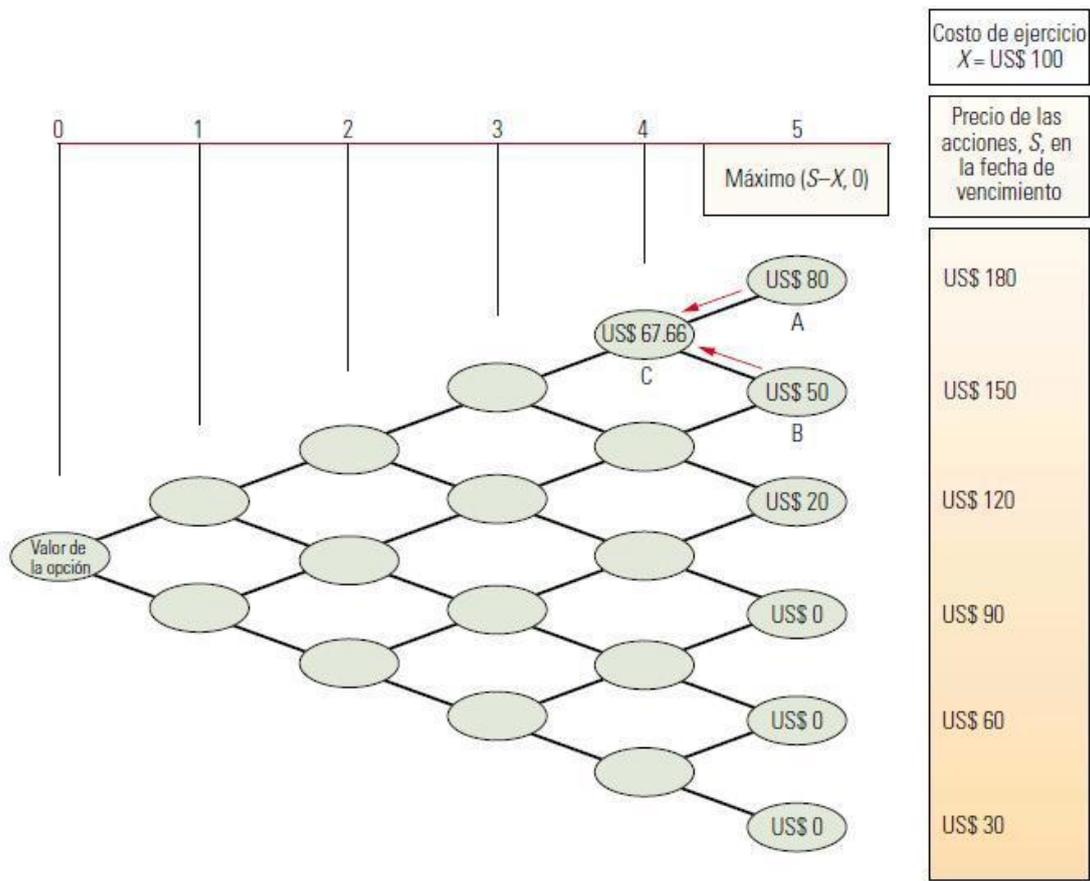


Figura 15: Construcción del reticulado de valoración (BAILEY, 2004)

El valor del nodo C se obtiene a partir de los dos nodos adyacentes de la Columna 5, A y B; utiliza la probabilidad neutral al riesgo,  $p$  a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{nodo C} = [ (p * \text{nodo A}) + ((1 - p) * \text{nodo B}) ] * e^{-rf * (t/n)}$$

$$p = \frac{e^{rf * (t/n)} - d}{u - d}$$

Los nodos y columnas restantes se construyen de un modo similar, de derecha a izquierda. El nódulo unitario de la izquierda contiene el valor de la opción.

### 3.3.2. Modelo de Black-Sholes

El modelo de valoración de opciones de Black- Scholes es un instrumento fiable que nos permite obtener el valor de una opción. El método, busca determinar la fórmula que incluya los factores que afectan al precio de las opciones, y al mismo tiempo, determinar cuántas opciones sufrirían el mismo cambio que el precio del activo subyacente.

Los supuestos básicos del modelo de *Black – Scholes*, que son similares al modelo binomial, son los siguientes:

- Mercado financiero perfecto: los inversionistas pueden pedir prestados los recursos monetarios que necesiten, sin limitación alguna, a la vez que prestar sus excedentes de liquidez al mismo tipo de interés sin riesgo ( $r_f$ ), que es conocido y considerado constante en el período estimado.
- No existen comisiones ni costos de transacción ni de información.
- Ausencia de impuestos, y si existen, gravarían por igual a todos los inversionistas.
- La acción o activo subyacente no paga dividendos ni cualquier otro tipo de reparto de beneficios durante el período considerado.
- La opción es de tipo europeo, sólo puede ejercerse a su expiración.
- Son posibles las “ventas al descubierto” del activo subyacente, es decir, ventas sin poseer el activo.
- La negociación en los mercados es continua.
- El precio del subyacente ( $S$ ) realiza un recorrido aleatorio con varianza ( $\sigma$ ) proporcional al cuadrado de dicho precio.
- La distribución de probabilidad de los precios del subyacente es logarítmico normal y la varianza de la rentabilidad del subyacente es constante por unidad de tiempo del período.

El valor teórico de una opción de compra se determina mediante la siguiente fórmula:

$$C = S * N(d1) - E * e^{-r*t} * N(d2)$$

donde:

$$d1 = \frac{\ln \frac{S}{E} + \left(r + \frac{\sigma^2}{2}\right) * t}{\sigma * \sqrt{t}}$$

y

$$d2 = d1 - \sigma * \sqrt{t}$$

siendo:

$C$  = Precio de la opción de compra

$S$  = Precio del activo subyacente

$E$  = Precio de ejercicio

$r$  = Tasa de interés en tiempo continuo

$t$  = Tiempo hasta la expiración de la opción

$\sigma$  = Volatilidad (varianza) en el valor del activo subyacente

$N(i)$  = Valores de la función de distribución normal estandarizada para ( $i$ )

$e$  = Base de los logaritmos neperianos 2.71823

$\ln$  = Logaritmo natural

Y el valor teórico de una opción de venta ( $P$ ), viene dado por la fórmula:

$$P = E * e^{-r*t} * N(-d2) - S * N(-d1)$$

donde los valores  $d1$  y  $d2$  son igual a los anteriores.

El modelo tiene dos principales limitaciones:

- No considera dividendos ni cualquier otro tipo de reparto de beneficios durante el periodo considerado.
- La opción es de tipo europeo, es decir solo puede ejercerse hasta su fecha de expiración.

Para el caso de la opción americana, sería necesario valorar la opción en las fechas potenciales de ejercicio y así seleccionar el máximo estimado.

### 3.4 Evaluación de los tipos de opciones reales

Para ir evaluando los tres diferentes tipos de opciones reales, iremos resolviendo un ejemplo sencillo para cada una de ellas, de esa manera ilustraremos tanto las formulas como su sencillo uso.

#### 3.4.1 Método Determinísticos

Para comenzar es necesario partir de un cálculo sencillo mediante un método determinísticos, vamos a ver:

Datos:

S=Precio de la acción o Valor actual de los flujos esperados del proyecto= 100

X = Inversión requerida para realizar el proyecto = 104

rf = tasa de interés libre de riesgo = 5 %

t= 1 periodo

$\sigma = 58.8\%$

Con estos datos el valor del proyecto seria:

$$VAN = S - X = 100 - 104 = -4$$

Con un valor negativo el proyecto debería ser desechado.

Ahora realizaremos la valoración aplicando el método binomial de valoración de opciones:

Primero calcularemos los coeficientes de ascenso y descenso, como ya lo vimos en este mismo capítulo.

$$u = e^{\sigma\sqrt{t}} = e^{0.588\sqrt{1}} = 1.8$$

$$d = \frac{1}{u} = 0.56$$

Las probabilidades neutrales al riesgo (p):

$$p = \frac{1 + rf - d}{u - d} = \frac{1 + 0.05 - 0.56}{1.8 - 0.56} = 0.395$$

$$1 - p = 0.605$$

Teniendo como resultado la siguiente figura

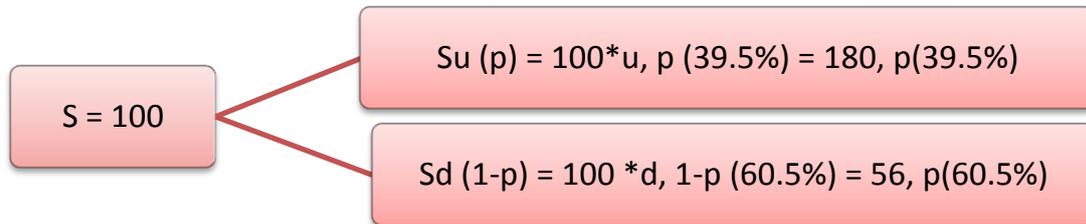


Figura 17: Método binomial de valoración de opciones

Calculando el valor del proyecto:

Suponiendo para fines prácticos,  $B = 0$  y  $H = 1$   $S_u = C_u$ ,  $S_d = C_d$

$$C = \frac{C_u p + C_d (1 - p)}{1 + r_f} = \frac{180 * 0.395 + 56 (0.605)}{1 + 0.05} = 100$$

### 3.4.2 Opción de crecimiento

Además de los datos del ejemplo anterior, vamos a considerar:

$X$  = inversión requerida para expandir o crecer el proyecto = 40

$a$  = aumento de la producción % = 50%

Consideraremos que transcurrió 1 periodo para poder tomar la decisión de crecer o no.

$$C_{u1} = C_{u0} + \text{Max} [aC_{u0} - X; 0] = 180 + \text{Max} [(0.5*180) - 40] = 230 \rightarrow \text{crecer}$$

$$C_{d1} = C_{d0} + \text{Max} [aC_{d0} - X; 0] = 56 + \text{Max} [(0.5*56) - 40] = 56 \rightarrow \text{no crecer}$$

Teniendo como resultado la siguiente figura:

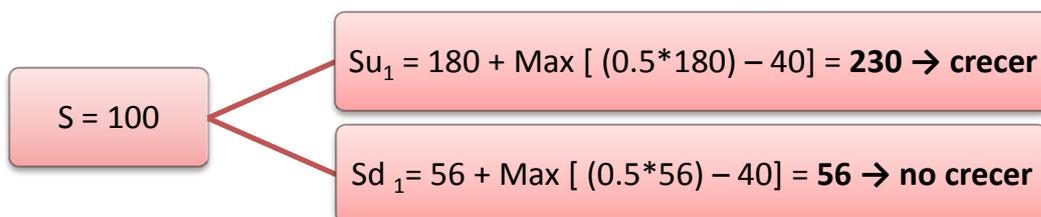


Figura 18: Opción de crecimiento

El valor total del proyecto, incluida la opción de crecimiento

$$C = \frac{Cu_1 p + Cd_1 (1 - p)}{1 + rf} - X_0 = \frac{230 * 0.395 + 56 * (0.605)}{1 + 0.05} - 104 = 14.79$$

Por lo tanto el valor de la opción de crecimiento será:

$$\text{Opción de crecimiento} = \text{VAN total} - \text{VAN básico} = 14.79 - (-4) = 18.79$$

### 3.4.3 Opción de espera

Nuevamente vamos a considerar los valores del primer ejemplo, recordemos que la opción de espera consiste en diferir la ejecución del proyecto un periodo, durante el cual esperamos a que las condiciones para su ejecución sean más convenientes.

Después de un periodo de tiempo, ahora la inversión inicial será:

$$X_1 = X_0 * (1 + rf) = 104 * 1.05 = 109.2$$

Por lo tanto los valores actuales, después de un año de espera, serán:

$$Cu_1 = \text{Max} [Cu_0 - X_1; 0] = \text{Max} [180 - 109.2] = 70.8$$

$$Cd_1 = \text{Max} [Cd_0 - X_1; 0] = \text{Max} [56 - 109.2] = 0$$

Teniendo como resultado la siguiente figura:

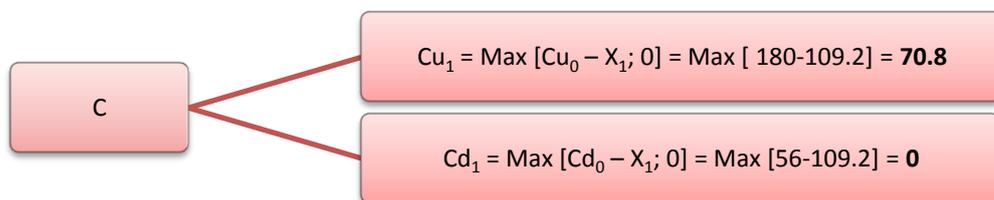


Figura 19: Opción de espera

El valor total del proyecto será:

$$C = \frac{Cu_1 p + Cd_1 (1 - p)}{1 + rf} = \frac{70.8 * 0.395 + 0 * (0.605)}{1 + 0.05} = 26.63$$

Por lo tanto el valor de la opción de espera será:

$$\text{Opción de espera} = \text{VAN total} - \text{VAN básico} = 26.63 - (-4) = 30.63$$

#### 3.4.4 Opción de abandono

La opción de abandono, es aquella que proporciona el derecho de vender, liquidar, abandonar, etc. un proyecto determinado a cambio de un precio, en un principio puede parecer una opción no tan lógica, sin embargo lo es cuando el proyecto representa pérdidas para la empresa, y aunque obviamente es necesario desembolsar cierta cantidad, a futuro, representará menores pérdidas.

La mejor manera de generar opciones de abandono es dividir un proyecto en etapas, teniendo la opción de abandonar el proyecto, antes del comienzo de cada etapa, dependiendo de cómo se vayan vislumbrando el futuro, con esto se va racionando el dinero, y disminuyendo las pérdidas en caso de fracaso. Por ejemplo para el caso de nuestra industria, al iniciar un proyecto de explotación de un campo como Chicontepec, se pueden tener ciertas expectativas, sin embargo conforme se va desarrollando el proyecto, si los pozos no resultan productores, si la producción no es la esperada, o si el precio del barril de petróleo se encuentra a la baja y no se vislumbra una mejora, es posible abandonar el proyecto si se realizaron contratos de renta de equipo, o de servicios de compañías hasta cierto tiempo a corto o mediano plazo.

Además la opción de abandono incluye la venta de la infraestructura adquirida para la realización del proyecto y que al no ser ocupada tiene un valor de liquidación, además del valor de liquidación que puede tener un proyecto, o la venta de la compañía misma. Esta opción de venta, será el valor actual del proyecto (VA), y será una opción e tipo americano, es decir, se puede ejercer en cualquier momento, y su precio de ejercicio será el del valor residual del proyecto (VR), o el de una mejor alternativa posible.

$$VA + \text{Máx} [VR - VA ; 0] = \text{Máx} [VA ; VR]$$

Así, el valor residual de la empresa de explotación petrolífera (o el de su mejor alternativa) se distribuye según el siguiente esquema temporal:

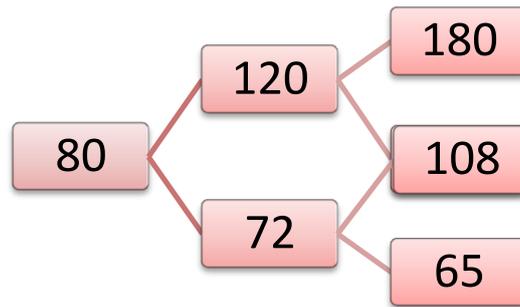


Figura 19: Opción de abandono

El valor residual actual ( $VR_0 = 80$  millones) es inferior al valor actual del proyecto ( $VA_0 = 100$  millones), el valor de 72 lo descartamos, sino, lo más lógico es que se hubiera optado desde antes por la opción de abandono, y no se tendría la primera pérdida.

El valor del proyecto, considerando que puede ser abandonado al término del primer año.

$$E_1^+ = \text{Max} [VA_1^+; VR_1^+] = \text{Max}[180; 120] = 180 \text{ (continuar)}$$

$$E_1^- = \text{Max} [VA_1^-; VR_1^-] = \text{Max}[56; 72] = 72 \text{ (continuar)}$$

El valor del proyecto, incluyendo el valor de la opción de abandono será:

$$E_0 \frac{pE_1^+ + (1-p)E_1^-}{(1+r_f)} - A_0 = \frac{0.395 * 180 + 0.605 * 72}{1 + 0.05} - 104 = 5.20$$

Y, por tanto, el valor de la opción de abandonar totalmente la producción es igual a:

$$\text{Opcion de abandono} = \text{Valor total} - \text{VAN basico} = 5.2 - 4 = 9.2$$

Es importante crear uno mismo las opciones de abandono, puede ser mediante los contratos con los proveedores de servicio con una base anual y no a largo plazo, en la medida de lo posible, los empleados pueden ser contratados mediante contratos temporales.

La existencia de una valiosa opción de abandono aumenta el deseo de invertir en un proyecto (lo mismo que una valiosa opción de reinvertir reduce las ganas de abandonar). Por ello, la opción de abandono tiene un efecto económico sobre las decisiones y, por lo general, no debe valorarse aisladamente. El valor de la opción de abandono aumenta:

- a) Cuanto mayor sea la incertidumbre sobre el valor futuro del proyecto.
  
- b) Cuanto mayor sea la relación entre el valor de abandono del proyecto (su valor de liquidación) respecto de su valor terminal o residual (valor actual de los flujos de caja libres restantes).

## Capítulo 4 Aplicaciones

### 4.1 ¿Cuándo usar las opciones reales?

Las opciones reales, no siempre se deben de aplicar a todos los proyectos, si su uso se realiza de manera forzada, este puede resultar complicado e incluso contraproducente, es por ello que es importante contemplar que resulta una herramienta adecuada cuando se presentan las siguientes situaciones:

- ✓ Cuando hay decisiones de inversión que pueden o no suceder, ya que otro tipo de enfoques no pueden valorar correctamente este tipo de oportunidades.
- ✓ Cuando la incertidumbre es bastante extensa y se torna sensitiva para esperar más información.
- ✓ Cuando parece que hay valor en posibilidades para futuras opciones de crecimiento en vez de actuales flujos de efectivo.
- ✓ Cuando la incertidumbre es bastante extensa para tomar la flexibilidad a consideración. Sólo el enfoque de las opciones reales puede corregir el valor de las inversiones en flexibilidad.
- ✓ Cuando haya actualización continua de proyectos y correcciones de estrategias a medio curso.

Gran parte de los proyectos tienen posibilidad de ser analizados mediante opciones reales, sin embargo para que su aplicación sea adecuada es recomendable que caiga en al menos tres de las situaciones anteriores.

Hay tres factores que nos ayudan a que el enfoque resulte exitoso:

El primero de ellos es estar constantemente en alerta para buscar y encontrar opciones reales y estar dispuesto a ejercerlas para poder aumentar el valor de un proyecto. La dirección del proyecto debe de ir desarrollando la habilidad de aplicación, ya que el hecho de que una empresa tenga opciones no quiere decir que las ejerce de manera inteligente. Para que funcione bien este enfoque se debe generar a través de la compañía una disciplina rigurosa desde la generación de las opciones hasta su correcta aplicación.

El segundo factor es ser un negocio líder, puesto que al serlo, se tiene mayor capacidad de generar opciones reales a través de inversiones, pero fundamentalmente se tienen los recursos humanos, técnicos y financieros necesarios para desarrollar estas opciones.

Por último, el tercer factor es un contexto muy incierto. Se debe reconocer que mientras más incierto el contexto en el que la compañía se desenvuelve, será mayor el valor de la opción. Esto último implica que la incertidumbre deja de ser un enemigo de la inversión para convertirse en una oportunidad. Opciones reales está destinado a modificar los escenarios de inversión en el mundo.

Las opciones reales deben ser un componente importante del proyecto. Si no lo son, es mejor analizarlo mediante otra metodología. Es de vital importancia evitar justificar malas inversiones con “dudosas” opciones reales.

## **4.2 Como las compañías petroleras pueden utilizar las opciones reales**

Hay algunas empresas como BP, Chevron Texaco, Statoil, Andarko y El Paso las cuales han mostrado interés en las Opciones Reales, si bien su metodología habitual para la evaluación de un proyecto es el análisis de flujos descontados, Monte Carlo y los arboles de decisión, han buscado las opciones reales como una herramienta más para complementar su análisis.

Buscando ilustrar posibilidades en las que las opciones reales representan una herramienta de gran utilidad, mencionaremos situaciones en las cuales, una empresa petrolera puede emplear el enfoque de las opciones reales:

### **4.2.1 Caso 1:**

Una compañía petrolera está considerando la posibilidad de adquirir una concesión en un área marina en la que se sabe que existe un yacimiento de aceite pesado en aguas profundas. Sin embargo, el precio actual del petróleo no cubre el costo de su extracción, además de que la tecnología adecuada se encuentra en desarrollo.

El proyecto no necesariamente debe ser desechado inmediatamente. La compañía petrolera no está obligada a extraer el petróleo ahora, puede adquirir la concesión y esperar a que el precio del petróleo suba (si existe incertidumbre con respecto a la evolución de los precios) o se disponga de la tecnología adecuada para extraer el petróleo.

La posesión de la concesión le brinda esta opción, pero si no lo adquiere hoy, no existirán estas posibilidades en el futuro. En este caso, el valor del proyecto será el de la concesión, más el de la opción de dejar el petróleo en la tierra para su explotación futura; si las condiciones de mercado y tecnológicas son las adecuadas.

#### 4.2.2. Caso 2:

Si una empresa petrolera, dueña de una concesión que se encuentra en etapa de exploración inicial, debe tomar la decisión de continuar invirtiendo en el proyecto, en busca de más recursos, comenzar a desarrollarlo, o aprovechar el capital en proyectos más eficaces respecto al capital invertido.

Mediante la técnica de opciones reales, es posible obtener el valor de las tres posibles opciones:

- Continuar con el proyecto como esta
- Invertir más para incorporar mayores reservas
- Abandonarlo parcial o totalmente y con esto invertir el capital en otros proyectos

El valor obtenido en cada caso, seguramente será diferente al obtenido mediante flujos de fondo descontado, puede ser mayor o menor, pero le permitirá a la empresa estar lista para tomar decisiones sobre el proyecto.

#### 4.2.3 Caso 3:

Siempre que se vayan a firmar contratos entre dos empresas, y estas vayan a compartir riesgos, por ejemplo entre la empresa dueña de la concesión para explotar un campo determinado y otra empresa de servicios, por ejemplo la que renta plataformas.

En la industria petrolera, el mayor riesgo siempre radica en las variaciones del precio del petróleo, ya que su incertidumbre suele ser muy considerable, incluso en el mediano plazo, mediante las opciones reales es posible compartir el riesgo de una manera más justa para ambas empresas, ya que similar a las opciones de compra y de venta, se pueden fijar precios previamente acordados de compraventa de servicios, y por ejemplo fijar primas de compensación en caso de que la variación de los precios sea mayor a la esperada.

### 4.3 Los pasos para la evaluación de un proyecto mediante opciones reales

Una vez que consideramos un proyecto a analizar mediante opciones reales, debemos proceder con una metodología que incluye tres partes principales:

1. Desarrollo de los casos de estudio
2. Valoración del valor presente neto y las opciones reales
3. Análisis de resultados

#### 4.3.1 Estructurar la aplicación

La parte más complicada del proyecto es la de calcular, estimar, comprender y usar el modelo con inteligencia. En muchas ocasiones una implantación pobremente estructurada, es el origen del error en la aplicación de las opciones reales.

Las opciones reales no están especificadas en un contrato, deben identificarse a través del análisis y el cálculo. La estructura es el paso más importante en el enfoque de las opciones reales, por eso podemos responder a las siguientes preguntas:

- a) La decisión: ¿Cuáles son las decisiones posibles?, ¿Cuándo pueden ser tomadas?
- b) La incertidumbre: Identificar causas y forma de evolución. ¿Cuál es el origen de la incertidumbre; ¿interna o externa?

#### 4.3.2 Implantar el modelo de valoración

Una vez planeada la opción y sus características, es necesario implantar el modelo de valoración de la opción, aplicable a las características propias del problema. Esto lo haremos de la siguiente manera:

- a) Establecer las variables. Un modelo de valoración de opciones tiene pocas variables, la mayoría de los datos requeridos se obtienen mediante el análisis de los flujos de fondo descontados. Entre las variables a considerar son: el valor actual del activo subyacente, la volatilidad del activo subyacente, el nivel de riesgo y la tasa de interés libre de riesgo.

- b) Valorar la opción con una “calculadora de opciones”. En esta tesis se utilizó el modelo de retículos binomiales. Los cálculos necesarios se pueden realizar mediante una hoja de cálculo EXCEL.

#### 4. 3.3 Examinar los resultados

- Comparar el valor a partir de las opciones reales contra el valor obtenido mediante otra metodología, en la mayoría de los casos mediante los flujos de efectivo descontados. A esta diferencia se le conoce como “valor de la incrustación” de opciones.
- Encontrar los valores críticos para la toma de decisiones estratégicas. Estos son el valor crítico de la estrategia de inversión a lo largo del tiempo, el nivel del valor del activo subyacente, además de localizar el momento óptimo para abandonar el proyecto, este puede no ser sencillo en un principio, en cambio se podrá determinar en el transcurso de la vida del proyecto.
- Perfil del riesgo de la inversión. Por ejemplo, si el valor en la estrategia de inversión comienza en el 60% de probabilidad de que habrá un buen resultado final, el riesgo para la estrategia es que hay un 40% de probabilidad de que la inversión sea abandonada.

#### 4. 3.4 Rediseñar si es necesario

Una vez realizado el análisis de resultados debemos preguntarnos: ¿hay forma de crear más opciones? ¿Hay otros posibles escenarios que no tenemos contemplados? Es muy importante ir mejorando y actualizando nuestro modelo, realizando esto tendremos la mejor valoración posible.

## 4.4 Ejemplos

En los ejemplos que realizaremos se analizaron diferentes etapas en la vida de un campo. Recordemos que los proyectos en nuestra industria se encuentran sometidos a una alta incertidumbre externa, por ejemplo el precio del barril puede variar considerablemente en tiempos cortos. Para la presente tesis se evaluaron tanto una opción de espera como una opción de cambio, en ambos casos, se utilizó la metodología por medio de retículos.

### 4.4.1 La opción de diferir una decisión

PEMEX estudia la posibilidad de construcción de una carretera, que reduzca la distancia y facilite considerablemente el transporte en uno de sus activos. Si bien el activo se encuentra en desarrollo, su producción aun no ha sido elevada; sin embargo, se planea la perforación de un pozo exploratorio en un área con potencial de hidrocarburos perteneciente al mismo activo.

Después de los estudios de viabilidad pertinentes, el valor obtenido mediante el análisis de flujos descontados (DCF), correspondiente a las reservas 1P con las que cuenta el activo, a una tasa de descuento del 10%, es de 280 millones de pesos; sin embargo el costo de construcción de la carretera es de 300 millones de pesos. El tipo de interés libre de riesgo es del 5%. El Valor Presente Neto (VPN) de la inversión es:

$$VPN = -300 + 280 = -20$$

El valor obtenido por DCF así como el valor de la inversión, son valores estimados medios, sometidos por tanto a un corto grado de incertidumbre.

La dirección del activo espera que dentro de un año tendrá el pozo exploratorio perforado, además de las pruebas de producción suficientes para realizar una mejor estimación sobre el nuevo yacimiento. Sin embargo, el esperar ese tiempo le representa un costo al activo de 8 millones, por el daño a los caminos que actualmente utiliza y las indemnizaciones, entre otros.

La volatilidad de la inversión viene determinada por la volatilidad de sus flujos netos de caja. Su valor del 80%, viene dado por la desviación típica o estándar de los rendimientos de los flujos, calculada a partir de los logaritmos neperianos de los sucesivos cocientes que resultan de dividir cada flujo neto de caja por el anterior.

Se pide calcular el valor de la opción y, en consecuencia, el Valor Actual Neto (VAN) revisado o (VAN) total.

$$VAN\ total = VAN\ normal + Valor\ de\ la\ opción$$

S = Valor actual de los flujos de caja

$\sigma$  = coeficiente de volatilidad anual

T = Tiempo remanente de vida de la opción, expresado en años o fracción de año

$r_f = \ln(1 + i)$  = interés continuo con riesgo equivalente al interés  $i$  anual

$u$  = Coeficiente de ascenso del valor que hace las veces de activo subyacente

$d = 1/u = \bar{\quad}$  = Coeficiente de descenso. Los coeficientes  $u$  y  $d$  miden la amplitud de la variación del subyacente.

$p$  = probabilidad

$$p = \frac{1 + r_f - d}{u - d}$$

Resolviendo el ejercicio:

S = 250

$r_f = 4.879$

$\sigma = 0.8$

T = 1

$$p = \frac{1 + r_f - d}{u - d} = \frac{1 + 0.04879 - 0.4493}{2.2255 - 0.4493} = 0.34 = 34\%$$

El árbol binomial es el siguiente:

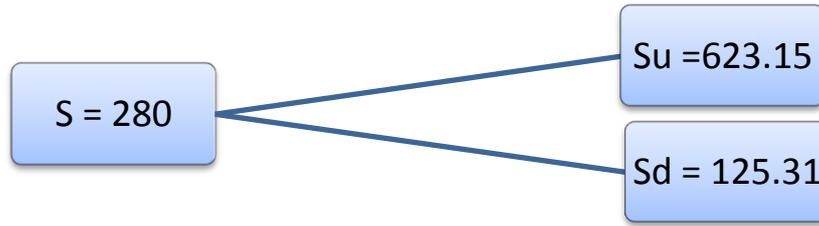


Figura 20: Árbol binomial del ejemplo 1

La decisión de realizar o no el proyecto al término del año 1 puede tomar dos posibles valores como podemos ver en la figura:

$$Cu_1 = \text{Max} [Cu_0 - X; 0] = \text{Max} [623 - 300 ; 0] = 323 \rightarrow \text{construir}$$

$$Cd_1 = \text{Max} [Cd_0 - X; 0] = \text{Max} [125.31 - 300; 0] = 0 \rightarrow \text{no construir}$$

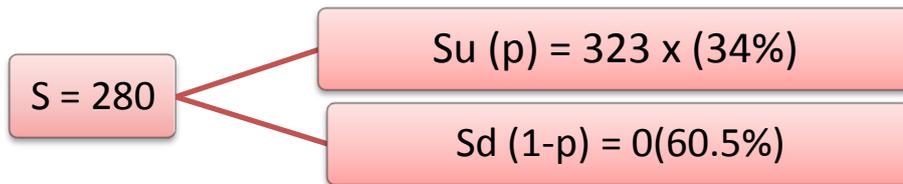


Figura 20: Valor de la opción de crecimiento

El valor total del proyecto, incluida la opción de crecimiento

$$C = \frac{Cu_1 p + Cd_1 (1 - p)}{1 + rf} - X_0 = \frac{323 * 0.34 + 0 * (0.60)}{1 + 0.05} - 8 = 96.59$$

Por lo tanto el valor de la opción de esperar será:

$$\text{Opción de espera} = \text{VAN total} - \text{VAN básico} = 96.59 - (20) = 106.59$$

Como podemos ver, aunque en este momento el proyecto se encuentra en mucha incertidumbre, vale la pena gastar los 8 millones en espera de tener mejores resultados para decidir si construir o no la carretera.

En su momento, en un año se volverá a evaluar y a tomar nuevas decisiones.

#### 4.4.2 La opción de cambio. Dimensionamiento de instalaciones para el campo Tsimin

Vamos a analizar la viabilidad al determinar la capacidad de un separador para un campo en nuestro país:

##### 4.4.2.1 Descripción del campo

El Campo Tsimin se ubica en el Golfo de México dentro de aguas territoriales de la Sonda de Campeche, a 9.3 kilómetros (km) al Noreste de la costa del municipio de Frontera, Tabasco, en un tirante de agua de 16.8 metros (figura 21). El pozo Tsimin-1 inicio su perforación el 04 de Noviembre del 2007 y se terminó el 20 de Diciembre del 2008, resultando productor de gas y condensado de 42 °API.

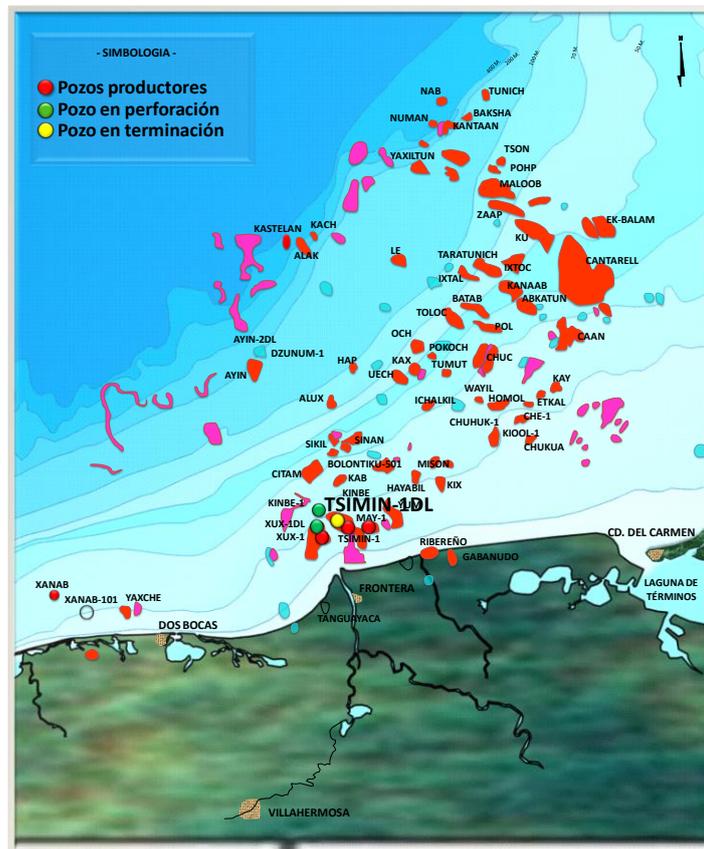


Figura 21: Plano de ubicación del campo Tsimin (PEMEX, 2011)

#### 4.4.2.2 Desarrollo del campo

Durante el 2010 se perforo el pozo exploratorio delimitador Tsimin-1DL, que se localiza a 13 km al NO de Frontera, Tabasco y a 91.7 km al NO de Cd del Carmen, Campeche, y a su vez a 3.3 km al NO del pozo Tsimin-1. Geológicamente se ubica en el Pilar de Akal alcanzó la profundidad de 6,230 m, resultando productor en el Jurásico Superior Kimmeridgiano (JSK) de aceite ligero de 43 °API, con un gasto de 3,820 bpd y gasto de gas de 17 mmpcd.

Durante 2010 el pozo delimitador Tsimin 1DL permitió reclasificar e incrementar reservas en el mismo yacimiento Jurásico Superior Kimmeridgiano.

#### 4.4.2.3 Reservas

Los límites areales horizontales anteriores para la clasificación de la reserva 1P fueron de 1.5 espaciamentos (1.5 km, área=6.1 km<sup>2</sup>) del pozo descubridor Tsimin-1, para el límite 2P fue 2.5 espaciamentos (2.5 km, área=12.12 km<sup>2</sup>) del pozo descubridor y para el límite 3P corresponde a un área=41.17 km<sup>2</sup> como lo ilustra la figura mostrada a continuación

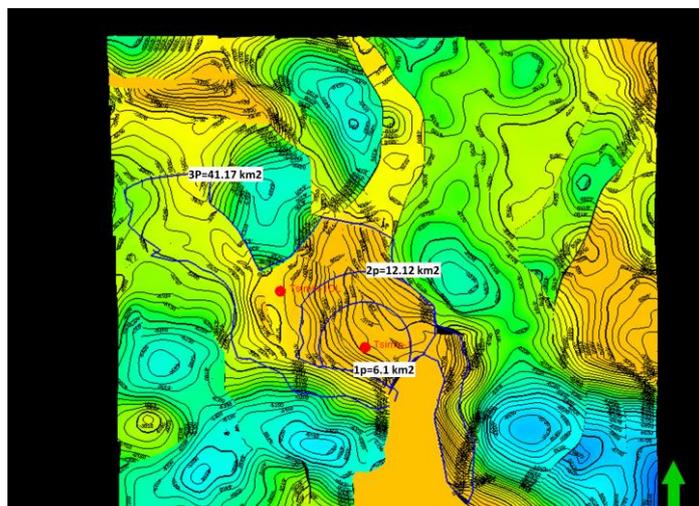


Figura 22: Áreas 1P, 2P y 3P originales, para el yacimiento JSK a partir del pozo Tsimin-1 (PEMEX, 2011)

Las reservas incorporadas de aceite, gas natural y petróleo crudo equivalente al 1 de enero de 2011 en el Campo Tsimin (solamente yacimiento JSK) se muestran en la tabla inferior. Para el yacimiento Cretácico la Reserva 3P es de 150.9 mmbpce (52.4 mmb aceite y 485.5 mmmpc de gas)

Categoría	Aceite mmb	Gas mmmpc	PCE mmb
1P	144.7	1037.5	355.2
2P	257.7	1913.4	645.8
3P	382.7	2844.1	959.7

*mmb = millones de barriles*

*mmmpc = miles de millones de pies cúbicos*

*PCE = petróleo crudo equivalente*

#### 4.4.2.4 Descripción del escenario de explotación del campo

El escenario de explotación considera la delimitación del campo por medio de dos pozos Tsimin-1DL y Tsimin-2D, la recuperación del pozo exploratorio Tsimin-1 y la perforación de 9 pozos de desarrollo. Asimismo, se contempla la construcción de dos estructuras recuperadoras de pozos (octápodos) y dos oleogasoductos que transporten la producción hacia el complejo de producción del campo May.

#### 4.4.2.5 Pronósticos de producción

Para los pronósticos de producción aun se encuentran en una muy alta incertidumbre, sin embargo se tiene previsto un pico máximo de producción de 180 millones de pies cúbicos diarios de gas y 23 mil barriles diarios de condensado.

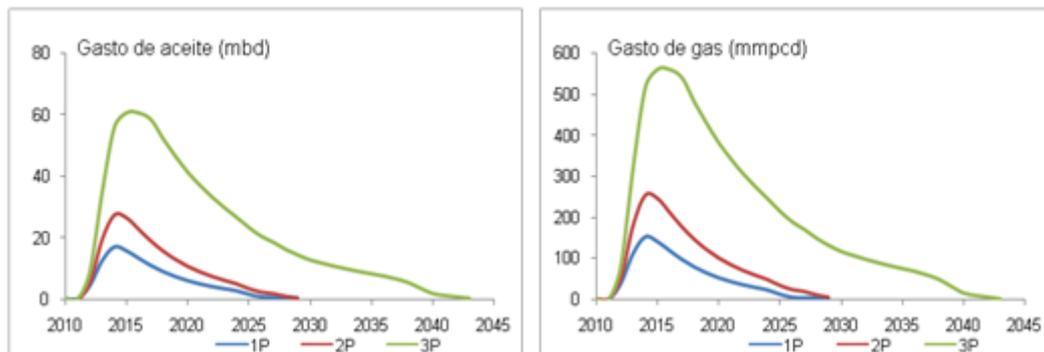


Figura 23: Comportamiento de producción de aceite y gas (PEMEX 2011)

#### 4.4.2.6 Variación de reservas de hidrocarburos

A partir del resultado exitoso del pozo Tsimin-1DL, se reclasificaron las reservas 1P, 2P y 3P. Al 1 de enero del 2011 se tienen los siguientes valores en las tres siguientes tablas:

Volumen original		Reserva remanente de hidrocarburos		
Crudo	Gas natural	Petróleo crudo equivalente	Crudo	Gas natural
mmb	mmmpc	mmbpce	mmb	mmmpc
254.1	1,131.4	237.5	102.9	663.8

Valores de reserva reclasificada 1P (PEMEX 2011)

Los valores previos de reserva 1P fueron: 117.7 mmmpce, con 41.8 mmb de crudo y 373.7 mmmpc de gas

Volumen original		Reserva remanente de hidrocarburos		
Crudo	Gas natural	Petróleo crudo equivalente	Crudo	Gas natural
mmb	mmmpc	mmbpce	mmb	mmmpc
464.3	2077.5	438.4	185.7	1246.2

Valores de reserva reclasificada 2P (PEMEX, 2011)

Los valores previos de reserva 2P fueron: 207.4 mmmpce, con 72.0 mmb de crudo y 667.2 mmmpc de gas

Volumen original		Reserva remanente de hidrocarburos		
Crudo	Gas natural	Petróleo crudo equivalente	Crudo	Gas natural
mmb	mmmpc	mmbpce	mmb	mmmpc
296.3	656.1	197.7	118.1	393.3

Valores de reserva reclasificada 3P (PEMEX, 2011)

Los valores previos de reserva 3P (solamente JSK) fueron: 762.0 mmmpce, con 264.6 mmb de crudo y 373.7 mmmpc de gas, mientras que en el yacimiento Cretácico, la Reserva 3P es de 150.9 mmbpce (52.4 mmb aceite y 485.5 mmmpc de gas)

#### 4.4.2.7. Problemática a evaluar

Como hemos visto, al ser un campo en desarrollo, se encuentra sujeto a una gran incertidumbre, puesto que aunque se tiene una atractiva reserva 1P, las posibilidades de incorporar nuevas reservas son altas.

La problemática surge, al momento de dimensionar todas las instalaciones, puesto que al encontrarse en ésta etapa, y la latente posibilidad de incorporación de reservas, se corre el riesgo de que la capacidad de las instalaciones resulte insuficiente a la necesaria, sin embargo sobredimensionar implica pérdidas en inversiones que no eran necesarias.

Ante un problema como éste, la teoría de las opciones reales, nos brinda la herramienta perfecta para analizar esta flexibilidad necesaria en la toma de decisiones, y nos permite evaluar mejor que cualquier otra técnica, un proyecto flexible en el tiempo.

#### 4.4.2.8 Evaluación

Como ya lo mencionamos, el problema técnico consiste en la determinación de la capacidad de las instalaciones para el manejo de la producción. En este momento, los pronósticos de producción indican una producción máxima de gas de 180 MMpc/d. Sin embargo ante la perforación de los nueve pozos de desarrollo, existe la posibilidad de que esta producción máxima sea de 210 MMpc/d en un escenario alto.

Construir las instalaciones con la capacidad de manejo de gas de 210MMpc/d implica un costo de 75 MMdls, mientras que para manejar 180 MMpc/d representa un costo de 50 MMdls.

La decisión de implementar el sistema de capacidad de 180 o implementar el de 210, deberá ser tomada a mas tardar en un año, el costo de implementación lo representan los 25 MMdls de diferencia entre ambas opciones.

Ambos casos, son casos independientes, con diferentes VPNs de flujo de fondos y diferentes volatilidades (puesto que por obvias razones el riesgo de producir 180 a producir 210 es muy diferente). Dichos VPNs fueron obtenidos mediante el programa Merak así como con hojas de cálculo de EXCEL.

Para el tercer año del proyecto tendremos los siguientes escenarios

<b>Producción de gas MMpc/d</b>	<b>180</b>	<b>210</b>
Volatilidad	15%	42%
VPN MMdls	376	478

La opción de cambio se analiza mediante la construcción de dos reticulados, uno para cada uno de las dos opciones. El caso más sencillo supone que estos dos reticulados están relacionados directamente, cada incremento de tiempo ascendente o descendente de un reticulado corresponde al mismo paso del otro. De esta manera, los nodos de ambos casos pueden ser comparados directamente para construir un reticulado de valoración con la flexibilidad de la toma de decisión.

**Reticulado del activo subyacente Escenario base**

**Datos**

VPN	376.00
Volatilidad ( $\sigma$ )	0.15
incremento de tiempo ( $\Delta t$ )	0.2
tasa libre de riesgo ( $r_f$ )	0.1
inversión adicional	25
u	1.07
d	0.94
probabilidad neutral al riesgo	0.63

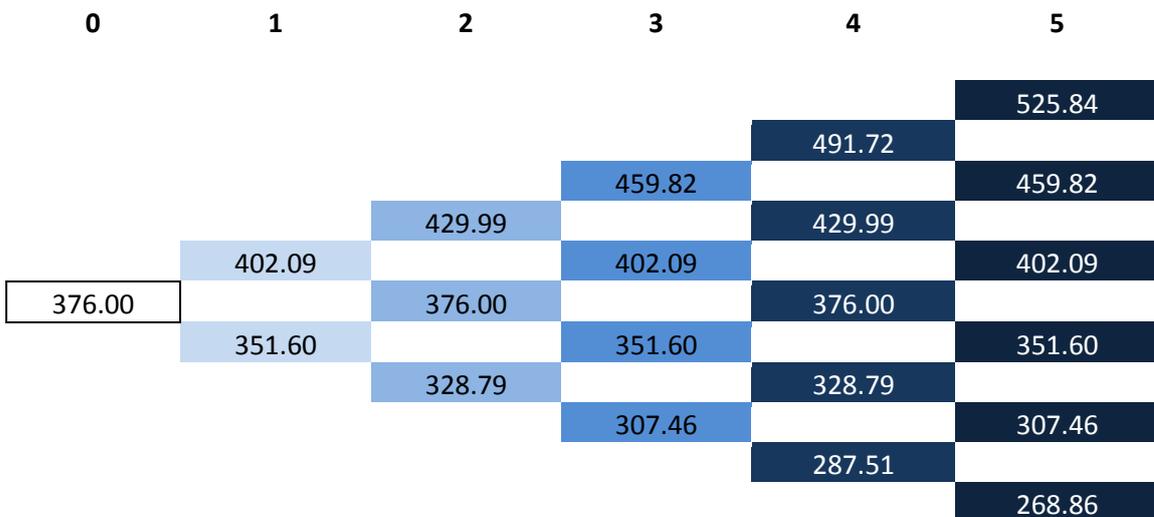


Figura 25: Reticulado del activo subyacente: escenario base

**Reticulado del activo subyacente Escenario alto**

**Datos**

VPN	478.00
Volatilidad ( $\sigma$ )	0.42
incremento de tiempo ( $\Delta t$ )	0.2
tasa libre de riesgo ( $r_f$ )	0.1
inversion adicional	25
u	1.21
d	0.83
probabilidad neutral al riesgo	0.51

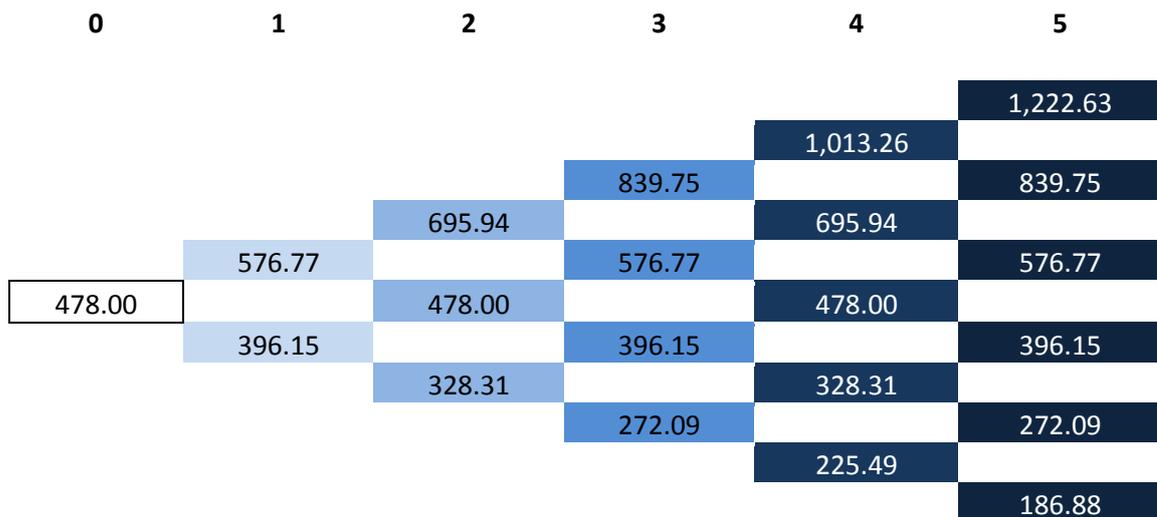


Figura 26: Reticulado del activo subyacente: escenario alto

El reticulado de valoración se obtiene sustrayendo el costo adicional por el manejo de la producción de 25 MMdls de la última columna del reticulado correspondiente al escenario alto. Posteriormente comparamos ese resultado con la última columna del reticulado correspondiente al caso base y seleccionamos el mayor valor de cada nodo.

Valores a comparar	
Opción 210	Opción 180
1,197.63	525.84
814.75	459.82
551.77	402.09
371.15	351.60
247.09	307.46
161.88	268.86

Esto refleja el derecho de PEMEX de tomar la decisión durante el año de elegir el mejor de los dos casos, ya sea que se presente un escenario en el que se obtenga mayor producción y con esto construir la infraestructura necesaria o de lo contrario no invertir en instalaciones sobredimensionadas.

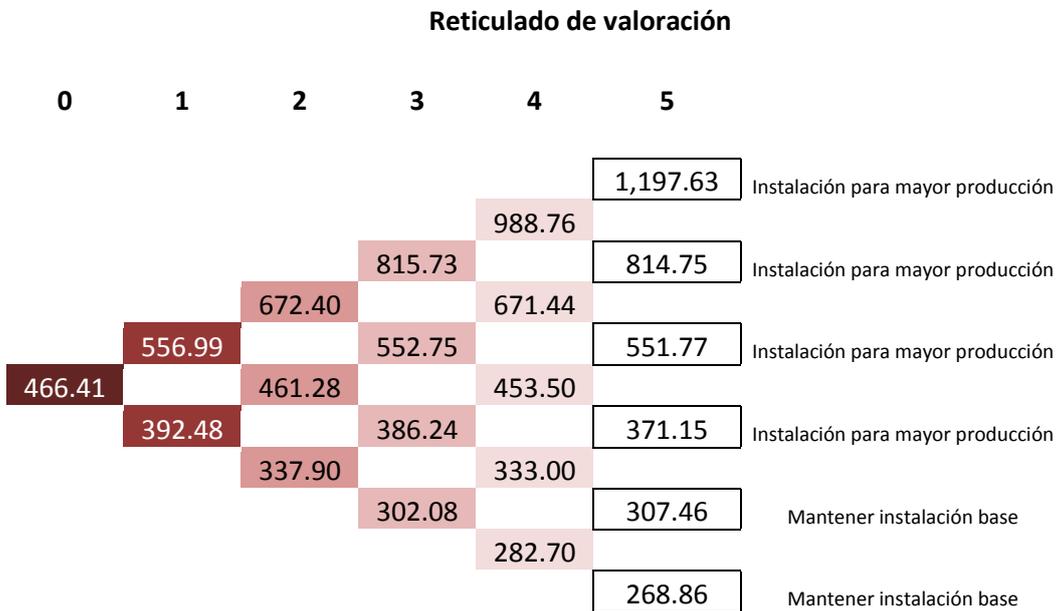


Figura 27: Reticulado de valoración ejemplo 2

#### 4.4.2.9 Análisis de resultados

El cambio del costo en la inversión, afecta el valor de la opción, como vemos el escenario base nos da un VPN de 376 MMdls, sin embargo la posibilidad de incrementar la producción nos incrementa hasta un valor de 466.

PEMEX deberá diferir la decisión el mayor tiempo posible, sin embargo el panorama en cualquier caso nos ofrece un valor muy atractivo.

#### 4.4.2.10 Propuesta adicional a las opciones reales

Para el presente ejemplo, además de la aplicación de las opciones reales, se buscó ampliar en cuanto a los alcances de la evaluación mediante la aplicación de una técnica que combine los árboles de decisión con la Simulación de Monte Carlo para cada nodo de incertidumbre.

Dicha metodología fue analizada mediante la aplicación del Software *Visual Montecarlo*, de SLB. Sin embargo, durante la aplicación de esta metodología no fue posible aterrizar de manera concluyente los resultados, sin embargo por la estructura de dicha metodología, notamos que cuenta con un gran potencial de aplicación en la evaluación de proyectos.

### 4.5 Problemática de aplicación de las opciones reales

Debemos recordar que la teoría de opciones reales, tiene su origen y metodología en una teoría financiera, por ende sus analogías conllevan limitaciones y problemas, ya que mientras en el mundo financiero las opciones son limitadas, las diversas posibilidades creadas por el ingenio humano limitan este tipo de modelado. Las situaciones reales habitualmente tienen muchas opciones incluidas, lo que complica el análisis.

Por ejemplo, en el mundo financiero, el tomador de una opción financiera tiene la garantía de que la opción puede ser mantenida hasta la fecha de vencimiento y, a pesar del movimiento del mercado, el valor de la opción no puede ser influido por las acciones de otros individuos.

En la mayoría de las opciones reales, no existe este tipo de garantía. En el caso concreto de nuestro país PEMEX no tiene competencia interna debido a su carácter de única compañía operadora, la competitividad del mundo real recae por ejemplo en las compañías de servicios.

Por ejemplo, cuando dos compañías se encuentran buscando la adquisición de una licitación, en un principio ambas tendrían idénticas opciones de invertir dinero en desarrollo de tecnología y con ello adquirir una ventaja competitiva una respecto de la otra, al ganar la licitación para un servicio recibirá recursos no desarrollados a cambio. Las acciones de una compañía pueden afectar los resultados comerciales de la otra.

Las opciones reales de espera en general siempre asignan un valor positivo a la demora, disminuyendo la incertidumbre y permitiendo que al momento de tomar la decisión sea la más conveniente, sin embargo en los casos donde existe competitividad la opción de participar o no en un concurso por una licitación nos reduciría el valor.

Debido a que estamos aplicando una teoría financiera a activos reales, las suposiciones necesarias a realizar que hemos visto en la tesis nos generan problemas al momento de aplicarla.

En el desarrollo de la presente tesis, encontramos muchos inconvenientes al momento de aplicarla, las opciones reales no pueden ser aplicadas a menos que se tenga la opción de flexibilidad, ya que su aplicación en proyectos que no cuentan con ésta, solamente nos arroja valores con dudosa credibilidad.

A continuación mencionaremos los principales problemas a los que se enfrenta en caso de aplicar las opciones reales:

#### **4.5.1 La varianza**

En los modelos que hemos visto, consideramos que la varianza del activo es conocida y constante, lo que en general es un supuesto válido en el corto plazo, sin embargo a largo plazo es muy probable que ésta se vea afectada y varíe en el transcurso del tiempo, esto debido al sinnúmero de cambios en la tecnología, los costos y los precios entre otros.

Aun está en discusión cual es el enfoque correcto para hallar este valor. La obtención de un cálculo a menudo implica realizar una simulación de Monte Carlo sobre el modelo de flujos descontados (DCF ) existente y examinar la desviación estándar del logaritmo natural de los retornos de flujo de fondos, en general, la mejor manera de enfrentar este problema es diseñar una serie de posibles escenarios futuros del comportamiento de los flujos del

proyecto, dichos escenarios que conforman nuestro modelo deben ser actualizados constantemente, permitiéndonos mejorar nuestro modelo obteniendo siempre la mejor valoración.

#### **4.5.2 El ejercicio no es instantáneo**

Mientras para los modelos de valoración de opciones financieras el ejercicio es instantáneo o prácticamente instantáneo, en las opciones reales y en especial en nuestra industria el ejercicio puede implicar realizar desembolsos y operaciones que duren varios años. Esto implica que el verdadero valor de la vida de la opción es inferior al calculado inicialmente.

Por ejemplo, si se planea explotar un campo petrolero durante 20 años, se tarda tres años desde que se toma la decisión de perforar (se ejerce la opción) hasta que se comienza a vender el petróleo extraído, implicará que la vida real de la opción es de 17 años.

Por lo tanto, las opciones reales no se benefician de la incertidumbre en sí, sino sólo de la flexibilidad para responder a la incertidumbre futura. Para tratar con este problema lo mejor es realizar un ajuste consistente en reflejar la pérdida de los flujos de caja que no se generan mientras se está ejerciendo el proyecto pero aun no se tienen ganancias. Es importante realizar desde un principio una adecuada estimación del tiempo que se demora en obtener los beneficios.

#### **4.5.3 El precio**

La fijación de precios de las opciones financieras se basa en el supuesto de que el activo subyacente puede ser negociado, lo que significa que existe un gran mercado líquido para ese activo. Esto no sucede en relación con las opciones reales. Los factores que afectan los precios de las opciones financieras también son más fáciles de determinar; es decir, son más transparentes que los de las opciones reales. Como ya lo vimos en el capítulo 2 de la presente tesis, el impacto que tiene el precio en el valor final del proyecto suele ser el más trascendente y en ocasiones el más difícil de predecir.

#### **4.5.4 El proyecto carece de la flexibilidad**

Al decidir evaluar un proyecto mediante la teoría de opciones reales, es indispensable que exista “la **opción**”, la teoría no puede aplicarse de manera convencional como el análisis de

flujo descontado, el proyecto debe de ofrecer alternativas que puedan incrementar el valor, es en ese caso en el que vale la pena evaluar dichas alternativas.

Si el proyecto carece de estas opciones, la aplicación de las opciones reales nos otorgará valores de dudosa credibilidad.

#### **4.6 La gestión de las opciones reales: una mentalidad enfocada a su aplicación**

La adecuada aplicación de las opciones reales surge desde la dirección de la empresa. Son quienes toman las decisiones en los proyectos quienes deben buscar añadir el valor a su gestión. Las empresas nunca deben ser inversores pasivos, las opciones reales representan una herramienta de gran utilidad para la evaluación de las inversiones de tal forma que permitan aumentar el valor de los proyectos.

Es importante desarrollar una mentalidad en busca de oportunidades y de opciones. La flexibilidad estriba en optar por cambiar el camino buscando incrementar el valor, ya sea mediante la espera de la decisión, el crecimiento del proyecto o incluso la opción de abandono, minimizando de ésta manera las pérdidas. El reconocimiento efectivo de las opciones incluidas en un proyecto es una cuestión de práctica; tener una mentalidad entrenada en el hábito de valorar las opciones reales puede ser una herramienta tan útil como cualquier otra.

El pensamiento enfocado en las opciones reales enfatiza y valora la flexibilidad de la dirección empresarial. Reconoce que en un mundo caracterizado por el cambio, la incertidumbre y las interacciones competitivas, la dirección empresarial puede desempeñar un rol activo. Puede alterar y modificar planes a medida que se dispone de nueva información y surgen nuevas posibilidades. Puede adoptar una actitud reactiva al cambio de circunstancias o una posición proactiva; interviniendo para aprovechar las posibilidades que permiten mejorar el valor del proyecto. Si los directivos de las compañías entienden que la flexibilidad es valiosa, buscara en esa flexibilidad en sus proyectos y la capitalizara para incrementar el valor para los accionistas.

##### **4.6.1. El valor de la flexibilidad**

El mayor valor de los proyectos al ser evaluados por medio de las opciones reales proviene de la flexibilidad asociada a la opción en sí; obviamente, es necesario que la opción

incremente el valor una vez adquirida y resulte ser exitosa. Esta oportunidad surge del hecho de que en la competitiva industria, las empresas aumentan el valor de sus proyectos al aumentar los recursos invertidos, al desarrollar y patentar tecnología, al adquirir infraestructura; incluso afectando el valor de las opciones de empresas competidoras.

La gerencia debe incorporar la flexibilidad como parámetro de generación de valor en su estrategia. Esta flexibilidad se hace más valiosa cuando se valora y cuantifica la incertidumbre inherente al proyecto; sin embargo, como todo riesgo suele ser difícil de evaluar y en la industria petrolera generalmente la evaluación será obtenida a partir de los análisis de sensibilidad y de la simulación de Montecarlo.

El grado de flexibilidad gerencial corresponde a la cantidad de opciones que tienen los proyectos de inversión. A mayor cantidad de opciones, mayor valor para el proyecto. Esto se debe a que esas opciones, permiten tomar decisiones en el futuro, logrando con esto limitar las pérdidas y aumentar las ganancias.

Esa flexibilidad que tienen las empresas, de esperar, abandonar o expandir los proyectos de inversión, es identificada apropiadamente por la metodología de las opciones reales; y es precisamente ese el gran aporte que esta técnica le da a la tradicional DCF.

El enfoque de la teoría de las opciones reales se orienta a capturar el valor implícito de dicha flexibilidad y considera a la gerencia como un ente activo, capaz de aprovechar las oportunidades que se le presenten durante el desarrollo de los negocios, posibilitados por una determinada inversión estratégica anterior. Esto la diferencia de la teoría del método del valor de flujos descontados DCF que, implícitamente, considera a la gerencia como un ente pasivo y no incluye el potencial de captura de valor luego de realizada la inversión inicial.

El concepto principal en el enfoque de la teoría de las opciones reales es el reconocimiento que la gerencia tiene en su capacidad de acotar las pérdidas, sin por ello perder la oportunidad de capturar ganancias adicionales si la oportunidad se presenta.

Por el contrario, al utilizar los métodos convencionales como el DCF, no reconocemos la capacidad de limitar las pérdidas y, debido a que utiliza una misma tasa de descuento para cada período (y para cada flujo de fondos proyectado), presupone que las acciones de la gerencia durante la vida de la inversión no tienen efectos sobre su nivel de riesgo.

El objetivo entonces es contar con una herramienta financiera que permita reaccionar rápidamente al contexto del proyecto que está en marcha, de acuerdo a lo que va sucediendo día a día.

#### **4.6.2. El papel de la empresa en el valor de sus opciones**

Por medio de una adecuada gestión de las opciones reales, la empresa puede aumentar el valor de las opciones antes de ejercerlas, haciendo que su valor sea mayor que el precio pagado por ellas. Existen algunas maneras en que las empresas pueden influir en dichos valores:

- Aumentando el valor actual de los cobros futuros esperados. Se consigue aumentando los ingresos. Para el caso de la industria petrolera puede ser aumentar el nivel de producción, o generando oportunidades de negocio secuenciales (opciones compuestas).
- Aumentando la incertidumbre de los flujos de caja esperados. Por ejemplo, las empresas extractoras de gas en el Mar del Norte han creado valor construyendo posiciones competitivas tempranas y utilizando sus licencias de explotación rápidamente. Sin embargo, algunas empresas han perseguido una estrategia basada en las opciones. Permiten a las empresas competencia que se adelanten en determinadas áreas geológicas, mientras que estas posponen sus inversiones hasta que la competencia les ha obligado a participar. Esta estrategia aumenta la incertidumbre proporcionando dos beneficios: 1º) estas compañías esperan para obtener nueva información que les permita acometer sus inversiones en el momento óptimo; 2º) se aseguran los mejores precios de sus clientes cuando éstos se ponen nerviosos debido a la incertidumbre asociada con el suministro de gas.
- Aumentando la vida de la opción. Las empresas pueden renegociar sus licencias de explotación, negociar el aumento del período de suministro exclusivo de materias primas por parte de los proveedores, bloquear los canales de distribución para un producto, etc.

Es indispensable realizar análisis de sensibilidad y reconocer los alcances que tiene la empresa, pues al afectar algunos de estos valores, por ejemplo la producción o la incorporación de reservas, pueden manejar la incertidumbre y generar nuevas opciones con valor agregado.

Al igual que en la teoría de la cartera de proyectos, las opciones reales también deben ser jerarquizadas por su valor como por su riesgo; si bien, al momento de la toma de decisiones se encuentran limitadas por restricciones externas e internas sobre las operaciones de la empresa. Éstas pueden ser técnicas, por falta de presupuesto para la inversión, por propias políticas de la empresa, etc. Podemos clasificar las opciones en tres categorías:

- Opciones con prioridad alta: En las que el valor de la opción es altamente sensible con respecto a las variables sobre las que la directiva puede actuar con facilidad. Por ejemplo, la aplicación de técnicas de perforación horizontal con objeto de maximizar las reservas petrolíferas recuperables.
- Opciones con prioridad media. En las que el valor de la opción es sensible a las variables sobre las que puede actuar, al menos, un competidor, pero no su propietario. Por ejemplo, la opción de alargar los permisos de perforación en una zona determinada valdrá más si ya se tiene instalada una infraestructura previa en comparación con otro inversor que parta de cero.
- Opciones con prioridad baja. En las que el valor de la opción es insensible a la posible actuación que tanto su propietario como la competencia puedan hacer sobre cualquiera de las variables básicas. La mayoría de opciones caen en esta categoría, por ejemplo las ligadas al precio de los hidrocarburos.

Las estrategias basadas en las opciones reales son diferentes a los sistemas tradicionales en su tratamiento del riesgo, la principal diferencia radica en el cambio de enfoque desde “miedo al riesgo/minimización de la inversión” a “buscar ganancias con riesgo/maximizar la información” teniendo ahora un amplio rango de posibles acciones, siendo crucial la utilidad de las opciones reales como instrumento estratégico más que como modelo de valoración.

Hay tres formas en las que la aplicación del análisis de las opciones reales a cada posibilidad de inversión, mejora las estrategias de una empresa:

- **Resaltando las oportunidades:** Ahora es necesario evaluar las oportunidades incrementales que surjan de los proyectos actuales con todo el rango de oportunidades disponible.
- **Considerando el valor de las opciones multietapa:** las inversiones multietapa en exploración, perforación y procesos de producción petrolera, están fuertemente apalancadas en cuanto que la inversión exploratoria representa sólo una pequeña fracción del total. Si bien las inversiones simultáneas en múltiples oportunidades, reducen tanto la posibilidad de ganancia como de pérdida, no necesariamente resultan la política más adecuada para la empresa.
- **Minimizando las obligaciones:** Recordemos que una opción es un derecho y no una obligación, al final siempre se puede tomar la decisión de no ejercer la opción.

Si bien la evaluación mediante opciones reales suele ser complicada de aplicar correctamente, estas complicaciones no deben disuadir la utilización de la técnica de las opciones reales. Es importante no dejar de lado la utilidad de otros métodos y no forzar su aplicación, lo más importante es tener el enfoque adecuado y buscar las oportunidades que puedan darle mayor valor al proyecto.

## Conclusiones

- Las opciones reales, constituyen la perspectiva de ver las alternativas que tiene un proyecto como derechos y no como obligaciones, teniendo siempre tres posibilidades: crecer, esperar o abandonar. Las opciones reales permiten evaluar la mejor alternativa.
- A diferencia de las técnicas tradicionales como el análisis de Flujos Descontados, la técnica de opciones reales brinda una herramienta en la evaluación de un proyecto que cuenta con alternativas que le puedan agregar valor. La evaluación mediante esta técnica considera que las compañías que llevan a cabo un proyecto tienen la oportunidad de adaptar y revisar las decisiones futuras en respuesta a los cambios de las circunstancias en torno a un proyecto.
- La teoría de las opciones reales tiene su origen y metodología en la teoría de opciones financieras; por ende, sus analogías conllevan limitaciones y problemas. Al aplicar dichas analogías a la industria petrolera es aun más importante tener precaución con éstas, en particular al evaluarlas a largo plazo.
- En el desarrollo de la presente tesis, encontramos muchos inconvenientes al momento de aplicar las opciones reales; la selección de los proyectos a evaluar y su correcta aplicación es complicada; cuando no se aplica de manera adecuada, los valores que arroja la evaluación son poco confiables. Es importante ser muy cuidadoso al momento de aplicarla. **Forzar su aplicación sin duda generará una evaluación errónea.**
- La formula de Black-Sholes, presenta muchas limitaciones para su aplicación; debe ser utilizada en decisiones a corto plazo y es recomendable en la opción de crecimiento.
- Los retículos binomiales son la manera más sencilla y práctica de utilizar las opciones reales, dado que permiten visualizar y obtener el valor adicional de la flexibilidad.

- Al decidir evaluar un proyecto mediante la teoría de opciones reales, es indispensable que exista “la **opción**”. La teoría no puede aplicarse de manera convencional como el análisis de flujo descontado o un análisis probabilista, el proyecto debe de ofrecer alternativas que puedan incrementar el valor, es en ese caso en el que vale la pena evaluar dichas alternativas.
- En la industria petrolera existe mucha flexibilidad durante toda la vida de los proyectos; es en estos casos en los que las opciones reales brindan la herramienta para evaluar dicha flexibilidad.
- En los proyectos de exploración y producción existen diferentes incertidumbres en las variables que determina su rentabilidad, como lo son la producción que se puede obtener o el precio al cual podemos vender los hidrocarburos, es por ello importante que por medio de las metodologías vistas en esta tesis, como las opciones reales podamos cuantificar los riesgos de llegar o no a tener ciertos resultados.
- Los proyectos de Exploración y Producción, son una cadena de decisiones e incertidumbres a lo largo del tiempo, las cuales no siempre son claras de visualizar y cuantificar. Las diferentes metodologías existentes, son auxiliares para la determinación de la mejor decisión.
- La metodología de opciones reales no sustituye las metodologías tradicionales, si no que las complementa en la toma de decisiones.
- Para una correcta aplicación de cualquier metodología de evaluación de proyectos en la industria petrolera, es indispensable que el especialista cuente con el conocimiento técnico suficiente (ingeniería de yacimientos: reservas, pronósticos de producción, modelos estáticos y dinámicos, etc.). En la presente tesis se dio énfasis en dichas bases para obtener resultados bien fundamentados.
- Durante la presente tesis, se trato de visualizar diferentes tipos de proyectos, profundizando en Tsimin que es un campo en desarrollo y es posible encontrar de manera más clara las opciones con las que cuenta, sin embargo también se ejemplificaron diferentes casos en los que el análisis mediante opciones reales representa la mejor herramienta a aplicar.

## Recomendaciones

- Debido a las limitantes de la fórmula de Black-Scholes, es recomendable de aplicar solamente en decisiones a corto plazo, siendo la opción de crecimiento la más recomendable. Mientras que para las demás opciones los retículos binomiales son los más adecuados.
- La presente tesis es apenas una base para la aplicación de opciones reales a la industria petrolera, se recomienda continuar con estos estudios para disminuir los errores y las dificultades que se enfrentaron hasta ahora, pues es una herramienta de gran potencial
- Se analizaron además metodologías que juntaban los árboles de decisión y la Simulación de Monte Carlo; sin embargo, no se obtuvieron resultados concluyentes; pero observamos un gran potencial debido a que combinan decisiones e incertidumbres de una manera clara y más apegada a la industria. Dicha metodología representa un área de gran oportunidad para una investigación a fondo
- Se recomienda que Pemex, así como la industria petrolera en general, busque un grupo de proyectos candidatos para ser evaluados mediante opciones reales, puesto que hasta el momento no ha sido una técnica que haya sido aprovechada.

## Referencias bibliográficas

- ADAMS, T. *et al.* 2004: “*Manejo de la cartera de activos para el crecimiento estratégico*”. Oilfield Review
- BABAJIDE, A. 2007: “*Real Options Analysis as a Decision Tool in Oil Field Developments*”. Thesis for the degree of Master of Science in engineering and management. Massachusetts Institute of Technology.
- BAILEY, B. 2004: “*Riesgos medidos*”. Oilfield Review.
- BAILEY, B. 2004: “*Valoración de las opciones reales*”. Oilfield Review.
- BARBER, A. 2008: “*Optimización de la producción desde el yacimiento hasta la planta de proceso*”. Oilfield Review.
- BRAVO, O. 2003: “*Metodología para el cálculo de opciones reales en la industria petrolera nacional*”. Ecopetrol- Dirección General de Planeación y Riesgos. Colombia.
- BEGG, S and Reidar B. 2002: “*The value of Flexibility in Managing Uncertainty in Oil and Gas Investments*”. SPE 77586
- BOER P, 2000: “*Valuation of Technology Using Real Options*”. Yale School of Management.
- CAMBELL, J.M. and Robert A. 1999. “*Measuring Strategic Investment Value*”. SPE 56453.
- COOPERSMITH, E. *et al.*: “*La toma de decisiones en la industria del petróleo y el gas*”. Oilfield Review.
- CHAVEZ E. 2004: “*Métodos alternativos de evaluación de proyectos: Opciones Reales*”. Universidad de ciencias económicas. Guatemala
- DAPENA, J. 2001: “*Flexibilidad, Activos Estratégicos y Valuación por opciones reales*”. Universidad del CEMA, Argentina.
- FIDALGO, S. 2007: “*Aplicaciones de la teoría de las opciones reales a la toma de decisiones en la industria del petróleo y del gas*”. Revista Petrotecnia
- GASTELUM, J. 2008: “*Administración de portafolios en proyectos de exploración y explotación de hidrocarburos*”. Tesis para obtener el título de ingeniero petrolero. UNAM
- GLINZ Férez, I. 2007: “*Apuntes de Planeación y Administración de Proyecto*”.
- GÓMEZ, C. 2004: “*Un caso de estudio para evaluar alternativas de inversión usando opciones reales*”. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, Universidad de Puerto Rico.
- HERNANDEZ Aguilar, D. 2002: “*Opciones reales: el manejo de las inversiones estratégicas en las finanzas corporativas*”. Tesis para obtener el título de licenciado en economía. UNAM

- MASCAREÑAS, J. 1999: “*Opciones reales en la valoración de proyectos de inversión*”. Universidad Complutense de Madrid.
- MEJIA Carbaja, O. 2002: “*Para medir la flexibilidad se deben usar opciones reales: una visión global*”. Universidad Icesi.
- MOORE, C. *et al.* 2005: “*The Use of Risk Adjusted Values in Exploration Portfolio Management*” SPE 94586.USA.
- NERI Flores, U. 2001: “*Análisis de riesgos en la exploración y producción de hidrocarburos*”. Tesis para obtener el título de ingeniero petrolero. UNAM
- PEMEX. 2010: “*Resumen Campo Tsimin*”. PEMEX, PEP
- RUTHERFORD, S. 2002: “*Deep Water Real Options Valuation: Waiting for Technology*”. SPE 77584. Andarko Petroleum Corporation.
- SAMPAYO Trujillo, A. 2009: “*Análisis de Opciones Reales como una herramienta en el Desarrollo de Campos*”, Gerencia de Reservas de Hidrocarburos y Proyectos de Exploración PEMEX Exploración y Producción.
- SCHLUMBERGER. 2005: “*Economía en la Industria del Petróleo*”. Schlumberger Information Solutions
- SCHLUMBERGER. 2005: “*Evaluación de proyectos*”. Schlumberger Information Solutions
- SCHLUMBERGER. 2005: “*Metodología de evaluación económica de proyectos de inversión*”. Schlumberger Information Solutions
- SCHLUMBERGER. 2005 : “*Teoría de Probabilidad*”. Schlumberger Information Solutions
- SPE/WPC/AAPG. 2001: “*Guidelines for the Evaluation of Petroleum Reserves and Resources*”. USA
- TRIGEORGIS L. 1995: “*Real Options in Capital Investment: Models, Strategies and Applications*”. Ed. Publishing Group Incorporated, USA.