

**ANÁLISIS DE RIESGO E INCERTIDUMBRE APLICADO A LA
EVALUACIÓN ECONÓMICA DE PROYECTOS DE INYECCIÓN DE VAPOR**



**KELLY MARGARITA COLMENARES VARGAS
EDWIN FERNEY MUÑOZ ROMERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2008

**ANÁLISIS DE RIESGO E INCERTIDUMBRE APLICADO A LA
EVALUACIÓN ECONÓMICA DE PROYECTOS DE INYECCIÓN DE VAPOR**

**KELLY MARGARITA COLMENARES VARGAS
EDWIN FERNEY MUÑOZ ROMERO**

Trabajo de grado para optar el título de Ingenieros de Petróleos

Director

**SAMUEL FERNANDO MUÑOZ NAVARRO
M. Sc. Ingeniería de Petróleos**

Co-directora

**DIANA PATRICIA MERCADO SIERRA
M. Sc. Ingeniería de Hidrocarburos**

Co-director

**OSCAR BRAVO MENDOZA
MBA e Ingeniero de Petróleos**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2008

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

El Grupo de Investigación de Recobro Mejorado, GRM UIS.

Instituto Colombiano del Petróleo, ICP.

Samuel Fernando Muñoz Navarro, Ingeniero de Petróleos, Director del proyecto, Universidad Industrial de Santander.

Diana Patricia Mercado Sierra, Ingeniera de Petróleos, Co-Directora del proyecto, Instituto Colombiano del Petróleo, ICP.

Oscar Bravo Mendoza, Ingeniero de Petróleos, Co-Director del proyecto, ECOPETROL.

Isaac Luque, Ingeniero de Petróleos, Colaborador del proyecto, MANSAROVAR.

Nelson Enrique León, Ingeniero de Sistemas, Colaborador del proyecto, Universidad Industrial de Santander.

Agradecemos a las personas e instituciones que nos brindaron su apoyo durante la preparación y desarrollo de este proyecto.

DEDICATORIA

ADios

A mis padres,

Lo dedico profundamente a mi mamá, que con su gran amor, me impulsa cada día más hacia mis sueños, todo lo que soy te lo debo a ti

A mis hermanos por su orientación y constante apoyo, todo lo que hago está motivado por ellos y para ellos

A José, por su compañía, apoyo y especialmente por ser mi mejor amigo, gracias porque tú conquistaste mi corazón con tu sonrisa y con tu amor.

A mis amigos Edwin y María Isabel, gracias por compartir momentos significativos en mi vida.

Mi gratitud a todos los que me acompañaron en este proceso.

Gracias UIS por ser parte de mi vida durante estos años.

Kelly

DEDICATORIA

A Dios, por proporcionarme los dones que han permitido llegar a donde estoy.

A mi mamá Inés, por ser la razón e inspiración de mis esfuerzos y la felicidad de mi existencia.

A mi papá Gerardo y a mi abuela Lorenza por cuidarme y guiarme desde esa distancia invisible paralela que nos separa, pero que no ha logrado olvidarlos.

A mis tías Graciela y Marina, por acogerme en sus familias como un hijo más.

A mi familia por ser cómplice de los eventos de mi vida.

Al destino por permitir encontrarme con amigas como Kelly, María Isabel y Jenny que me enseñaron y me soportaron durante este episodio.

A mis maestros por ser intermediarios en la transferencia del saber.

A todas aquellas personas, amigos y compañeros que se alegran con mis logros.

EDWIN

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	
1. ANÁLISIS DE RIESGOS E INCERTIDUMBRE EN LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DE UN PROYECTO PETROLERO	3
1.1. RIESGO E INCERTIDUMBRE	4
1.2. RIESGOS PRESENTES EN PROYECTOS PETROLEROS	5
1.2.1. Riesgos estratégicos	5
1.2.2. Riesgos de asignación de recursos	6
1.2.2.1. Contratistas	6
1.2.2.2. Mayores costos a los iniciales esperados	6
1.2.2.3. Atrasos en la ejecución	7
1.2.2.4. Dificultades para tratar, almacenar y transportar el hidrocarburo	7
1.2.2.5. Mayores costos de producción	7
1.2.3. Riesgos Operacionales	8
1.2.3.1. Hallazgo o presencia de hidrocarburos	8
1.2.3.2. Volumen económico de reservas	8
1.2.3.3. Tecnologías necesarias para el recobro de hidrocarburos	9
1.2.3.4. HSE	9
1.2.3.5. Riesgos organizacionales	9
1.2.4. Riesgos del entorno	10
1.2.4.1. Riesgos Comerciales	10
1.2.4.2. Riesgo País	10

1.2.4.3. Grupos de interés	11
1.3. MANEJO INTEGRAL DE RIESGOS	12
1.3.1. Ciclo de administración del riesgo	12
1.3.1.2. Establecer el contexto	14
1.3.1.3. Identificación de los riesgos	16
1.3.1.4. Análisis de riesgos	17
1.3.1.5. Evaluación de riesgos	18
1.3.1.6. Tratamiento de los riesgos	20
1.3.1.7. Monitorear y revisar	22
1.3.1.8. Comunicar y consultar	22
1.4. PROCESO DE TOMA DE DECISIONES	23
2. DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS QUE IMPLICAN RIESGO E INCERTIDUMBRE EN LA EVALUACIÓN ECONÓMICA EN PROYECTOS DE INYECCIÓN DE VAPOR.	28
2.1. CARACTERIZACIÓN DEL RIESGO	28
2.2. IDENTIFICACIÓN DE LOS RIESGOS	30
2.3. CLASIFICACIÓN DE LOS RIESGOS	32
2.3.1. RIESGOS DE ENTORNO	32
2.3.1.1. Seguridad Física del personal y de las instalaciones	35
2.3.1.2. Orden público	36
2.3.1.3. Agentes climáticos	37
2.3.1.4. Impacto ambiental de emisiones y vertimientos	37
2.3.1.5. Riesgo reflejado en la tasa de descuento	38
2.3.2. RIESGOS FINANCIEROS	39
2.3.2.1. Mala formulación y evaluación del proyecto	40
2.3.2.2. Volatilidad del precio de los hidrocarburos	41
2.3.2.3. Caracterización inadecuada del yacimiento	43
2.3.2.4. Volumen no esperado de hidrocarburos	44
2.3.2.5. Costos de consumo de gas natural	44
2.3.2.6. Costos para tratamiento del crudo y agua	45

2.3.2.7. Altos costos de operación	46
2.3.2.8. Abandonar pozos por problemas mecánicos	47
2.3.2.9. Robo del recubrimiento del aislante de las líneas de distribución de vapor	48
2.3.3. RIESGOS POR ATRASOS EN LA EJECUCIÓN	48
2.3.3.1. Demoras en el proceso de compra de materiales	49
2.3.3.2. Paradas inesperadas de equipos	50
2.3.3.3. Fallas en el equipo de levantamiento	51
2.3.3.4. Disponibilidad de gas natural	52
2.3.3.5. No contar con el agua suficiente para generación de vapor	52
2.3.3.6. Fallas en las líneas de conducción de fluidos	53
3. METODOLOGÍA PARA ANALIZAR EL RIESGO E INCERTIDUMBRE PRESENTE EN LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DE PROYECTOS DE INYECCIÓN DE VAPOR	54
3.1. CARACTERIZACIÓN DEL RIESGO	57
3.2. ANALISIS DE RIESGOS	59
3.2.1. Análisis cualitativo	60
3.2.2. Análisis semicuantitativo	62
3.3. ANALISIS DE SENSIBILIDAD	65
3.3.1. Análisis tornado	66
3.3.2. Análisis tipo araña	68
3.4. SIMULACION MONTECARLO	69
3.4.1. Características básicas	71
3.4.2. Algoritmo para implementar una Simulación Montecarlo	71
3.4.3. Matemática detrás de la Simulación Montecarlo	73
3.4.4. Funciones de distribución e histograma	74
3.4.4.1. Pruebas de bondad y ajuste	76
3.4.4.2. Histogramas de frecuencia	77
3.4.5. Análisis de correlación	79
3.4.6. Generación de números aleatorios	82

3.4.7. Intervalos de confianza	84
3.4.8. Construcción del modelo de simulación	88
3.5. DIAGRAMA DE FLUJO	89
4. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA	97
4.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	97
4.2. EVALUACIÓN DETERMINÍSTICA DEL PROYECTO	98
4.3. ANÁLISIS DE RIESGO E INCERTIDUMBRE	104
CONCLUSIONES	119
RECOMENDACIONES	120
BIBLIOGRAFÍA	121
ANEXO A	124

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proceso de administración de riesgos	13
Figura 2. Mapa de riesgos	15
Figura 3. Proceso de toma de decisiones	24
Figura 4. Etapas en la evaluación de un proyecto	27
Figura 5. Diagrama de influencia de variables económicas sobre el VPN	30
Figura 6. Esquema del diagrama de influencia	31
Figura 7. Diagrama de influencia. Riesgos de entorno políticos	33
Figura 8. Diagrama de influencia. Riesgos de entorno económicos	34
Figura 9. Diagrama de influencia. Riesgos de entorno ambiental	36
Figura 10. Diagrama de influencia. Riesgos financieros	39
Figura 11. Variación del precio del crudo WTI en los últimos años	42
Figura 12. Diagrama de influencia. Riesgos financieros. Sobrecostos	46
Figura 13. Diagrama de influencia. Riesgos por atrasos en la ejecución	49
Figura 14. Metodología para la evaluación económica de un proyecto de inyección de vapor	56
Figura 15. Proceso de análisis del riesgo e incertidumbre	57
Figura 16. Proceso de caracterización del riesgo	58
Figura 17. Información recopilada para identificar el riesgo	59
Figura 18. Proceso del análisis de riesgos	60
Figura 19. Valoración cualitativa del riesgo	62
Figura 20. Esquema del análisis semicuantitativo	63
Figura 21. Valoración para los riesgos de entorno	64
Figura 22. Valoración para los riesgos financieros	64
Figura 23. Valoración para los riesgos por retrasos en ejecución	65

Figura 24. Proceso del análisis de sensibilidad	66
Figura 25. Esquema del análisis tornado	67
Figura 26. Diagrama del análisis tipo araña	68
Figura 27. Función para el cálculo del coeficiente de correlación	81
Figura 28. Reporte de sobrecostos en el tiempo por riesgos	81
Figura 29. Reporte de los coeficientes de correlación	81
Figura 30. Análisis de datos en Excel®	83
Figura 31. Generación de números aleatorios en Excel®	83
Figura 32. Flujograma del proceso de simulación Montecarlo	87
Figura 33. Gráfica en porcentaje del costo por MMBTU	102
Figura 34. Gráfica VPN del proyecto	103
Figura 35. Matriz de riesgos del proyecto	111
Figura 36. Análisis de sensibilidad tipo tornado	112
Figura 37. Análisis de sensibilidad tipo araña	113
Figura 38: Evaluación para precio del petróleo	115
Figura 39: Comportamiento costos operativos, OPEX	116
Figura 40: Esquema flujo de caja del proyecto.	117
Figura 41: Simulación VPN del proyecto.	118

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valor total de la inversión para inyección cíclica	98
Tabla 2. Ingresos del proyecto	99
Tabla 3. Egresos del proyecto	100
Tabla 4. Flujo de caja del proyecto	101
Tabla 5. Costo por MMBTU	102
Tabla 6. Caracterización del riesgo de entorno	104
Tabla 7. Caracterización del riesgo financiero	106
Tabla 8. Caracterización del riesgo por retrasos en ejecución	108
Tabla 9. Análisis semicuantitativo. Riesgos de entorno	110
Tabla 10. Análisis semicuantitativo. Riesgos financieros	110
Tabla 11. Análisis semicuantitativo. Riesgos por retrasos en ejecución	111

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DE RIESGO E INCERTIDUMBRE APLICADO A LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DE PROYECTOS DE INYECCIÓN DE VAPOR.*

AUTORES: KELLY MARGARITA COLMENARES VARGAS; EDWIN FERNEY MUÑOZ ROMERO.**

PALABRAS CLAVES: Inyección de vapor, riesgo, incertidumbre, gestión de riesgos, toma de decisiones.

En la actualidad los crudos pesados se han convertido en una alternativa energética muy importante a nivel mundial, trayendo consigo el desarrollo tecnológico y la aplicación de los procesos de recobro térmico, siendo estos los más adecuados para la extracción de este tipo de crudos.

Colombia es un país con grandes reservas de crudo pesado y bajos niveles de producción de este recurso, por ello se hace necesaria la implementación de un método de recuperación mejorada como la inyección de vapor siendo esta una de las técnicas más exitosas a nivel mundial, que permite extraer una mayor cantidad de crudo proporcionando un aumento en las reservas de hidrocarburos.

Sin embargo, la implementación de esta técnica requiere de estudios compuestos por un componente técnico y económico y a su vez por un análisis de riesgos e incertidumbre; por tal motivo se desarrollo una metodología conforme al proceso de gestión integral de riesgos, que consiste en el manejo eficiente de planificación, organización, dirección y control dirigido a la reducción de riesgos.

Identificar y medir las variables críticas que afectan el proyecto, facilitan la labor de dirección y control durante su ejecución. Analizar y evaluar estos proyectos, obliga a destinar recursos solo a aquellos que ofrecen la mayor rentabilidad, y que a la hora de tomar la decisión de invertir, presenten un alto grado de certeza de que su desarrollo arrojará resultados exitosos.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico – Químicas. Ingeniería de Petróleos.
Director: M. Sc. Samuel Fernando Muñoz Navarro.

ABSTRACT

TITLE: RISK AND UNCERTAINTY ANALYSIS APPLIED TO THE ECONOMIC EVALUATION OF PROJECTS OF STEAM INJECTION.*

AUTHORS: KELLY MARGARITA COLMENARES VARGAS; EDWIN FERNEY MUÑOZ ROMERO.**

KEY WORDS: Steam injection, risk, uncertainty, management of risk, taking decisions.

At present the heavy oil they have turned into an energetic very important alternative worldwide, bringing technological development and the application of the processes of thermal recovery, being these most adapted for the extraction of this type of oil.

Colombia is a country with many reserves of heavy crude oil and low levels of production of this resource, by it there becomes necessary the implementation of a method of recovery improved as the steam injection being this one of the most successful technologies worldwide, that allows to extract a major quantity of crude oil providing an increase in the reserves of hydrocarbons.

Nevertheless, the implementation of this technology needs of studies composed by a technical and economic component in turn by an analysis of risks and uncertainty; for such a motive was developed a methodology in conformity with the process of integral management of risks, which consists of the efficient managing of planning, organization, direction and control directed the reduction of risks.

To identify and to measure the critical variables that affect the project, they facilitate the labor of direction and control during its execution. To analyze and to evaluate these projects, it forces to destine resources only to those that offer the major profitability, and that at the moment of taking the decision to invest, it present a high degree of certainty of which its development will throw successful results.

* Graduate project.

** Faculty of Physical and Chemical Engineering. Petroleum Engineering.
Tutor: M. Sc. Samuel Fernando Muñoz Navarro.

INTRODUCCIÓN

Una de las técnicas que mayor éxito ha tenido en la recuperación de hidrocarburos en el mundo es la inyección de vapor. El desarrollo de este tipo de proyectos requiere de altas inversiones, por lo tanto merece un estudio y manejo adecuado dados los altos costos de operación y desarrollo.

Antes de llevar a cabo la ejecución de un proyecto de inyección de vapor, es necesario considerar como primera medida un análisis técnico para decidir su aplicabilidad. De la misma manera, se debe tener en cuenta un estudio económico, ya que esto determinará finalmente la factibilidad de la implementación del proyecto.

Los métodos utilizados para realizar una evaluación económica, consisten en modelos determinísticos que no contemplan la presencia de la incertidumbre ni del riesgo propio de las variables que intervienen en el proyecto y que afectan los resultados. Por esto, el análisis de riesgo e incertidumbre es especialmente valioso cuando los resultados son de gran importancia y se desean tomar decisiones para el cumplimiento de los objetivos.

Con la gestión de riesgos se determinan las posibles combinaciones de alternativas que cumplen con las condiciones técnicas, económicas, políticas, sociales, de factibilidad y rentabilidad, permitiendo contar con mejor información para la toma de decisiones bajo incertidumbre, convirtiendo una inversión incierta en una oportunidad y estableciendo una perspectiva económica de la posibilidad que existe de implementar un proyecto de

inyección de vapor, como método de recobro mejorado para aplicar en yacimientos de crudo pesado.

El presente estudio se enfoca especialmente, hacia el análisis de riesgos en proyectos de inyección de vapor, por lo cual se plantea una metodología que parte de un proceso de caracterización, priorización de riesgos, análisis de sensibilidad y simulación Montecarlo; elementos claves que permiten una evaluación de los riesgos en forma sistemática y económica.

1. ANÁLISIS DE RIESGO E INCERTIDUMBRE EN LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DE UN PROYECTO PETROLERO

Existen dos aspectos fundamentales que están presentes en el desarrollo de todo proyecto del sector petrolero. El primero se refiere al estudio técnico-económico de todos los factores que afectan la puesta en marcha y la economía del mismo, el segundo, al entendimiento y evaluación de los riesgos e incertidumbres a los que está expuesto. Este último es el de mayor importancia, ya que permite tener una mejor idea del panorama completo del proyecto de inversión, captando así los diferentes cursos de acción y sus posibles eventos asociados, así como la magnitud de las inversiones que cada curso de acción origina.

El análisis de riesgo e incertidumbre es el proceso de estimar la probabilidad de que ocurra un acontecimiento y la magnitud de sus efectos adversos. Con este proceso se pueden determinar las posibles variaciones que se presentan en los flujos de caja esperados. Una vez conocidos los mayores factores de riesgo, se procede hacer su gestión, que consiste en tomar las acciones necesarias para mitigar, aceptar, evitar y aprovechar los factores críticos y así garantizar el éxito del proyecto. La cuantificación de la incertidumbre permite a las compañías identificar y controlar la ocurrencia de fallas, mejorando la evaluación de los riesgos, convirtiendo una inversión incierta en una oportunidad.

Cabe señalar que éste análisis de riesgo e incertidumbre no debe solamente efectuarse antes de enfrentar una nueva actividad o inversión, sino en todo momento ya que permite identificar las áreas de alto riesgo y su estrategia de

remediación respectiva, lo que ayuda a una mejor toma de decisiones y consecuentemente a una asignación eficiente de recursos.

1.1. RIESGO E INCERTIDUMBRE

El riesgo en forma general, es una medida de la variabilidad de los posibles resultados que se pueden esperar de un evento; expresado como la suma de eventos que afecta el flujo de caja negativamente.

Matemáticamente el riesgo se define como la multiplicación de la probabilidad de ocurrencia de un suceso por la severidad de su impacto.

$$R = P \times I$$

(1)

Donde:

R = Valor del Riesgo

P = Probabilidad de ocurrencia

I = Intensidad de las consecuencias

Es importante diferenciar entre riesgo e incertidumbre. La incertidumbre existe siempre que no se sabe con seguridad lo que ocurrirá en el futuro. Desde el punto de vista financiero, la incertidumbre de un proyecto es la medida de la dispersión de los flujos de caja esperados, o el elemento sorpresa con respecto al retorno esperado, la cual puede ser medida como la desviación estándar de dichos flujos mientras que el riesgo contempla las posibilidades de perder dinero al considerar las variables más importantes en

el desarrollo del proyecto.¹ Por ejemplo, existe incertidumbre de que mañana pueda llover, lo cual implica un riesgo para quien no lleve paraguas y una oportunidad para quien necesite rociar su jardín. Como se ve, toda situación riesgosa es incierta, pero puede haber incertidumbre sin riesgo.

Tradicionalmente, al hablar de riesgo se reconoce implícitamente la oportunidad asociada a una situación adversa, por lo que riesgo e incertidumbre suelen ser sinónimos.

1.2. RIESGOS PRESENTES EN PROYECTOS PETROLEROS

El universo de los riesgos a los que está expuesto un proyecto es muy amplio, en razón a que prácticamente toda actividad que se va a realizar implica incertidumbres. Para estudiar estas incertidumbres es importante tener claridad sobre el entorno en que se desenvuelve; por lo que se deben revisar periódicamente las fortalezas y debilidades internas, a fin, no solamente de revisar la estrategia, sino de establecer los factores críticos de éxito, y a partir de estos, identificar los riesgos a los que está expuesto para el cumplimiento de sus objetivos y metas.

Existe una serie de riesgos comunes en la industria petrolera que deben considerarse al momento de identificar los riesgos de cualquier proyecto, los cuales son clasificados en cuatro categorías: estratégicos, de asignación de recursos, operacionales y de entorno.

1.2.1. Riesgos estratégicos Se refiere a todos aquellos aspectos relacionados con la formulación estratégica, tales como los mercados,

¹ SANCHEZ M, BRAVO O, Gestión Integral de Riesgos. BRAVO & SANCHEZ PUBLICACIONES 2007. p. 38.

cambios tecnológicos y altos costos de materia prima, los cuales pueden afectar el proyecto y por tanto su desempeño dentro de la industria.

1.2.2. Riesgos de asignación de recursos Son los asociados a las fases de análisis, evaluación, decisión de inversión y agrupamiento en los proyectos y oportunidades de negocio en el flujo de caja de la compañía. Dentro de estos encontramos:

1.2.2.1. Contratistas Al utilizar contratistas o socios como formas de reducir o transferir el riesgo para proveer bienes y servicios para el proyecto, requiere de manejo cuidadoso a que no siempre dichos agentes poseen las capacidades para asumir los riesgos como se espera de ellos. Así, una cuidadosa selección de los contratistas y/o socios basada en sus capacidades reales de ejecución (entendimiento del trabajo deseado, capacidad financiera, habilidad para manejar proyectos complejos, interrelación con el entorno) es importante y puede llegar a ser significativa para su desarrollo.

En vista de que es tan difícil controlar esta parte, la utilización de garantías, retención de pagos, bonificaciones y otros estímulos, son importantes para reducir la magnitud del riesgo.

1.2.2.2. Mayores costos a los iniciales esperados Están relacionados con los sobrecostos que puede llegar a tener un proyecto y con frecuencia llegan a afectar considerablemente los retornos esperados del mismo. Se incluyen los mayores costos debido a factores tales como: falta de oferta de compañías de servicios petroleros, lo que lleva a un incremento de las tarifas cobradas; problemas con los diseños de las facilidades; dificultades en la importación de componentes críticos, o la necesidad de

realizar actividades tales como remediaciones y estimulaciones de pozos que no estaban consideradas originalmente.

1.2.2.3. Atrasos en la ejecución Ocurren debido a la falta de consideración de todos los agentes que hay que tener en cuenta para la ejecución del programa inicial, tales como: mala planeación, no contar con el personal idóneo, demora en la consecución de permisos, problemas en la adquisición de tierras, situación de orden público, disponibilidad de equipos, entre otras, que en conjunto ocasionan retrasos en la ejecución del proyecto. Todo lo anterior impide lograr los beneficios en el tiempo estimado originalmente, incrementando los costos, y por ende reduciendo su valor presente neto.

1.2.2.4. Dificultades para tratar, almacenar y transportar el hidrocarburo Se presentan debido a la falta de capacidad de las facilidades de superficie, impidiendo que el hidrocarburo sea producido y exportado. Adicionalmente se deben considerar los casos en que el producto no pueda ser transportado hasta el punto de entrega, debido, entre otros, a falta de capacidad de los oleoductos disponibles, voladuras, o a muy alta viscosidad del crudo a transportar, todo lo cual genera atrasos a la hora de obtener los ingresos proyectados.

1.2.2.5. Mayores costos de producción Está asociada a la posibilidad de que los costos operacionales relacionados con el proyecto sean mayores que los presupuestados en la evaluación inicial, debido, entre otras causas, a que no se consideraron todos los factores futuros para la obtención de ingresos o se calcularon en forma errónea, o a que no se clasificaron en forma adecuada los componentes de costo: fijo, variable, escalonado y semivariable.

1.2.3. Riesgos operacionales Se refiere a todos aquellos obstáculos u oportunidades que se presentan en la operación del día a día, y que impiden el alcanzar los objetivos y metas trazados. Son riesgos muy importantes para una empresa cuando se habla de proyectos. Incluye los riesgos relacionados con los perfiles de producción o demanda esperados, los márgenes de diseño de facilidades y el valor de la información requerida para mejorar el conocimiento. Debido a su naturaleza, requieren para su análisis de conceptos de diferentes expertos, y principalmente, de análisis de datos históricos de otros proyectos en el área. Dentro de esta categoría, los principales riesgos a tener en cuenta son:

1.2.3.1. Hallazgo o presencia de hidrocarburos Agrupa los casos en que no se encuentran hidrocarburos en cantidades comerciales para ser explotados, y la probabilidad de que ese hidrocarburo sea crudo o gas. Para el caso de un pozo de desarrollo implica la posibilidad de que el resultado final sea un pozo seco. La habilidad y suerte de la empresa para encontrar hidrocarburos son fundamentales para el éxito y supervivencia de la misma.

1.2.3.2. Volumen económico de reservas Es el más importante una vez se han encontrado los hidrocarburos en cantidades comerciales, e incluye el volumen de reservas, calidad del hidrocarburo encontrado, el número de pozos a perforar y su espaciamiento, el factor de recobro final, costos de producción y su declinación.

Normalmente lo que se debe evaluar en un proyecto relacionado con esta variable es la cantidad de pozos que se puede perforar por año, su producción inicial y tasa de declinación, para que se vean reflejados en los perfiles de producción; así como las posibilidades de que se abandonen los pozos por problemas mecánicos durante la perforación, o más adelante

durante la vida productiva, impidiendo la generación de los flujos de caja esperados. Si se consideran proyectos de recuperación secundaria, factores como el tiempo de llenado y la heterogeneidad del yacimiento deben ser tenidos en cuenta.

1.2.3.3. Tecnologías necesarias para el recobro de hidrocarburos

Incluyen métodos y técnicas requeridas para la producción del máximo volumen de reservas, y considera entre otras, la metodología de perforación, daños de formación y necesidad de estimulación de los pozos, requerimientos de mantenimiento de presión y recobro mejorado, sistemas de levantamiento artificial y producción temprana de agua o gas. Si se utiliza una metodología que se está probando, se debe tener presente que la magnitud del riesgo asumido debe ser justificada por la ganancia esperada.

1.2.3.4. HSE Se pueden presentar situaciones en las que se afecta la producción, incluso hasta el cierre del campo, como consecuencia de demoras en la consecución de permisos ambientales para adelantar obras, derrame de hidrocarburos o inconvenientes en el vertimiento de aguas producidas o gases venteados a la atmósfera. Los problemas de seguridad se pueden presentar como consecuencia del manejo de hidrocarburos que requieren especial cuidado, corrosión de líneas y facilidades de superficie y falta de experiencia del personal que opera las facilidades. Estos factores revisten cada vez mayor importancia.

1.2.3.5. Riesgos organizacionales Incluye los aspectos relacionados con el retiro de personal clave para el desarrollo del proyecto, manejo indebido de los recursos, dificultad para contar con los recursos personales o financieros, retrasos en las aprobaciones o firma de contratos y otros similares, que pueden demorar considerablemente la ejecución y pueden ser

considerados de acuerdo con el nivel de compromiso y experiencia del equipo del proyecto.

1.2.4. Riesgos del entorno Se hacen evidentes al momento de rendir cuentas como parte del desempeño, y que no dependen de fallas en los procedimientos internos de la compañía. Dentro de esta categoría, los principales riesgos a tener en cuenta son:

1.2.4.1. Riesgos comerciales A diferencia de lo riesgos técnicos, los riesgos comerciales son mucho más difíciles de predecir, debido a que generalmente no pueden ser controlados por los encargados del proyecto. El más importante de ellos es el precio de los hidrocarburos.

- **Precio de los hidrocarburos** La fluctuación en los precios internacionales del crudo y los precios internos de gas son factores críticos para determinar la viabilidad del proyecto. Un correcto análisis y medición son muy importantes a fin de poder ilustrar al inversionista sobre los riesgos y oportunidades disponibles. Hoy día, gracias a la existencia de diferentes instrumentos de coberturas es posible reducir la exposición a esta variable.

1.2.4.2. Riesgo país

- **Cambios en las variables macroeconómicas** Aspectos tales como la inflación, devaluación y tasas de interés pueden afectar en alguna forma la economía del proyecto, especialmente para el caso de aquellos financiados con capital denominado “en moneda extranjera”.
- **Cambios en la política fiscal del país** Cambios en las reglas del juego en materia fiscal y el manejo de regalías pueden modificar la

decisión de inversión para un proyecto, especialmente en el caso de aquellos de carácter marginal.

- **Situación de orden público** Si bien en muchos casos los problemas de orden público se reflejan en mayores sobrecostos del proyecto, ocurren circunstancias en las que, a causa de voladuras a la infraestructura (puentes, equipos, torres eléctricas, oleoductos, facilidades de producción) y situaciones diversas, se debe restringir o suspender la producción total o parcialmente.
- **Situación política del país** Comprende las posibilidades de nacionalización de la industria, cambio en la estabilidad política de la nación, corrupción y demoras en los trámites, burocracia y falta de cumplimiento de los acuerdos establecidos a nivel estatal.

1.2.4.3. Grupos de interés Efecto que tienen los diferentes grupos de interés presión o interesados directamente en el desarrollo del proyecto, los cuales puede tener los intereses positivos o negativos y que, por su complejidad de manejo, hacen que sea muy difícil desarrollar una estrategia para enfrentarlos.

En el aspecto social, se pueden producir dificultades como consecuencia de la afectación a comunidades indígenas, etnias, ciertas minorías y la comunidad en general.

Como estrategia de manejo, se debe procurar realizar un listado de los diferentes grupos de presión, identificar sus intereses en el desarrollo del proyecto, y constantemente revisarlo fin de no ser sorprendido por ciertas

acciones que se puedan presentar en un momento dado y puedan afectar su desarrollo.²

1.3. MANEJO INTEGRAL DE RIESGOS

El concepto de administración del riesgo es muy amplio y puede definirse como la identificación, medición, control y transferencia de los riesgos a los que está expuesto un proyecto, y que puedan de alguna manera afectar la viabilidad de las operaciones futuras. El manejo integral del riesgo o gestión integral de riesgos en proyectos de inversión en la industria petrolera ha presentado una gran evolución en los últimos años. Esto obedece a la creciente necesidad de conocer y manejar los niveles de incertidumbre a los que se está expuesto un proyecto durante la ejecución de la estrategia y el cumplimiento de los objetivos.

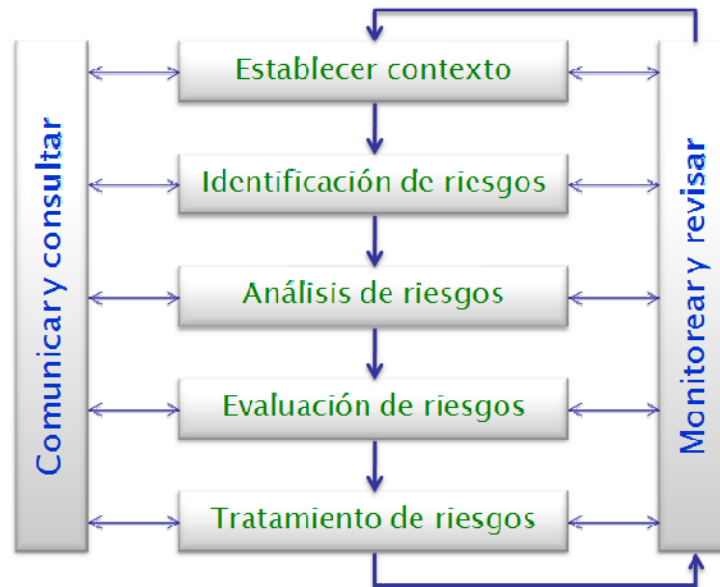
Es importante resaltar que la gestión del riesgo está relacionada, tanto con la identificación y aprovechamiento de oportunidades, como la prevención y mitigación de pérdidas. Todo proyecto se basa en proyecciones de escenarios. Al no tener certeza sobre los flujos futuros que ocasionará cada inversión, se estará en una situación de riesgo o incertidumbre. Por esto, lo más importante en un proyecto es la generación sostenible de beneficios y utilidades en el corto y largo plazo.

1.3.1. Ciclo de administración del riesgo El ciclo de administración de riesgos, *Figura 1*, implica adelantar simultáneamente un proceso de mejoramiento continuo. En la primera oportunidad, cuando se cuenta con poca experiencia y conocimiento del estado de los riesgos, se realiza un

² SANCHEZ M, BRAVO O, Op. Cit., p. 199 - 204.

análisis cualitativo, y se evalúan en forma general las diferentes alternativas de mitigación posibles.³

Figura 1: Proceso de administración de riesgos



Posteriormente, en la medida que se aprende más, es posible mejorar tanto la medición de los riesgos, como la efectividad de los esquemas de control. En consecuencia, se logra mejorar la eficiencia de la gestión de riesgos.

1.3.1.1. Establecer el contexto Como punto de partida, debe definirse el alcance que se debe dar al proceso de gestión de riesgos en el proyecto, de acuerdo con el grado de conocimiento y la disponibilidad de recursos. Igualmente es importante definir el grado de complejidad que se debe dar al proceso: si se desea dar el control sobre los riesgos del entorno, operacionales, de asignación de recursos o estratégicos, según sea el caso.

³ SANCHEZ M, BRAVO O, Op. Cit., p. 103.

A la par, es importante definir la organización que se va a hacer cargo de coordinar el proceso y reportar los avances.

Todo lo anterior se agrupa en la política de manejo de riesgos de la compañía y de los objetivos estratégicos, con el cual se busca crear una conducta y un enfoque hacia el riesgo, mediante la selección del proceso y las áreas a analizar, y de esa forma determinar las escalas de medida para la frecuencia y la severidad de manera preliminar.

1.3.1.2. Identificación de los riesgos El proceso de la identificación del riesgo debe ser permanente, integrado al proceso de planeación y responder a las preguntas qué, cómo y porqué se pueden originar hechos que influyen en la obtención de resultados.

Es importante tener en cuenta que los factores que pueden incidir en la aparición de los riesgos pueden ser externos e internos y pueden llegar a afectar la organización en cualquier momento; entre los factores externos deben considerarse además de los que pueden afectar directamente al proyecto; factores económicos, sociales, de orden público, políticos, legales y cambios tecnológicos entre otros. Entre los factores internos se encuentran, la naturaleza de las actividades del proyecto, las personas que hacen parte de la organización, los sistemas de información, los procesos y procedimientos y los recursos económicos.

Una manera de realizar la identificación del riesgo es a través de la elaboración de un mapa de riesgos, *Figura 2*, el cual como herramienta metodológica permite hacer un inventario de los riesgos ordenada y sistemáticamente, definiendo en primera instancia los riesgos, posteriormente presentando una descripción de cada uno de estos y finalmente definiendo las posibles consecuencias.

Figura 2: Mapa de riesgos.

Riesgo *	Descripción **	Posibles consecuencias ***

***Riesgo.** Posibilidad de ocurrencia de aquella situación que pueda entorpecer el normal desarrollo de las funciones de la entidad y le impidan el logro de sus objetivos.

****Descripción.** Se refiere a las características generales o las formas en que se observa o manifiesta el riesgo identificado.

*****Posibles consecuencias.** Corresponde a los posibles efectos ocasionados por el riesgo, los cuales se pueden traducir en daños de tipo económico, social, administrativo, entre otros.

El proceso de la identificación del riesgo debe ser permanente, basado en el resultado del análisis del contexto estratégico, en el proceso de planeación y debe partir de la claridad de los objetivos estratégicos de la entidad para la obtención de resultados. La identificación de riesgos se debe realizar al interior ya sea de cada una de las áreas operativas y de soporte de la empresa, o del equipo del proyecto, analizando aquellos eventos que podría afectar el cumplimiento de los objetivos específicos del área, establecidos para responder a las estrategias del plan de negocios o al cumplimiento de las metas en tiempo y costo del proyecto.

Es importante que en la identificación se defina un procedimiento amplio que tenga en cuenta todos los riesgos, estén o no bajo control del proyecto, ya que ésta etapa constituye en muchas ocasiones la fase más crítica dentro del proceso de gestión integral de riesgos.⁴

⁴ Guía Administración del Riesgo. Departamento administrativo de la función pública. Bogotá. 2006. p. 15.

1.3.1.3. Análisis de riesgos El análisis del riesgo es un proceso de mejora continua, que busca estimar las probabilidades de que se presenten acontecimientos indeseables, permitiendo medir la magnitud de dichos impactos negativos en el transcurso de ciertos intervalos específicos de tiempo. Así, el análisis de riesgos, consiste no sólo en una observación detallada y sistemática, sino que principalmente es una propuesta metodológica, que permite el conocimiento de los riesgos y sus fuentes o causas, las consecuencias potenciales, y la probabilidad de que esto se presente.

Se han establecido dos aspectos a tener en cuenta en el análisis de los riesgos identificados, *Probabilidad e Impacto*. Por probabilidad se entiende como la posibilidad de ocurrencia del riesgo y puede ser medida con criterios de *Frecuencia*, si se ha materializado (por ejemplo: No. de veces que se presentó un evento en un tiempo determinado), o de *Factibilidad* teniendo en cuenta la presencia de factores internos y externos que pueden propiciar el riesgo, aunque éste no se haya materializado. Por *Impacto* se entiende las consecuencias que puede ocasionar al proyecto la materialización del riesgo.

Para adelantar el análisis del riesgo se deben considerar los siguientes aspectos:

La **calificación del riesgo**. Se logra a través de la estimación de la probabilidad de su ocurrencia y el impacto que puede causar la materialización del riesgo. La primera representa el número de veces que el riesgo se ha presentado en un determinado tiempo o puede presentarse, y la segunda se refiere a la magnitud de sus efectos.

La **evaluación del riesgo**. Permite comparar los resultados de su calificación, con los criterios definidos para establecer el grado de exposición del proyecto al riesgo; de esta forma es posible distinguir entre los riesgos aceptables, tolerables, moderados, importantes o inaceptables y fijar las prioridades de las acciones requeridas para su tratamiento.⁵

1.3.1.4. Evaluación de riesgos El objetivo de esta etapa es valorar cada uno de los riesgos identificados de acuerdo con su probabilidad de ocurrencia y con el impacto que pudieran tener sobre el cumplimiento de los objetivos. La evaluación del plan de manejo de riesgos se debe realizar con base en los indicadores de gestión diseñados para tal fin y los resultados de los monitoreos aplicados en diferentes períodos. Así mismo, se evaluará como ha sido el comportamiento del riesgo y si se han presentado nuevos riesgos que deban ser controlados.

Si bien es cierto que se está realizando una evaluación, no se puede entender que esta es la etapa final del proceso, todo lo contrario con la evaluación se está obteniendo información importante para reformular el plan de manejo de riesgos, agregar las acciones para controlar los nuevos riesgos detectados, generar dentro de las dependencias y áreas un ambiente de compromiso, pertenencia y autocontrol y posibilitar a través de la retroalimentación el mejoramiento en el logro de los objetivos institucionales.

Como punto de partida de la administración de riesgos, conviene enfatizar en la importancia de la medición como esquema de control y gestión. La medición condiciona el comportamiento de los individuos, y les permite contar con un mecanismo objetivo para la mejora de cualquier situación que se esté analizando.

⁵ Guía Administración del Riesgo. Op. Cit., p. 15.

Dentro de los beneficios de la medición y el control de la gestión de riesgos, se encuentran:

- Permite gerenciar los recursos y, cuando conviene, la reducción de costos.
- Mejora de planeación y cumplimiento de metas
- Permite un incremento de la productividad.
- Genera un mecanismo objetivo de comparación en el desempeño
- Identifica necesidades y requerimientos de educación y desarrollo.
- Permite la generación de información necesaria para una adecuada toma de decisiones.

Gracias a la medición es más fácil aprovechar el conocimiento y aplicarlo a nuevas situaciones. Así mismo, simplifica comunicar a otros los análisis hechos en condiciones de incertidumbre, y facilitar la toma de decisiones. El propósito de la medición de riesgos es el poder brindar elementos de juicio que permitan mejorar la calidad de las decisiones.⁶

1.3.1.5. Tratamiento de los riesgos El tratamiento de los riesgos puede definirse como la selección e implementación apropiadas para tratar el riesgo. De ahí que sea importante tener una valoración completa de los riesgos, ya que es necesario conocer si se está en capacidad de absorberlos o controlarlos.

⁶ SANCHEZ M, BRAVO O, Op. Cit., p. 13.

Cualquier esfuerzo que se emprenda en torno a la valoración del riesgo llega a ser en vano, si no culmina en un adecuado manejo y control de los mismos definiendo acciones factibles y efectivas, tales como la implantación de políticas, estándares, procedimientos y cambios físicos entre otros, que hagan parte de un plan de manejo. Para el manejo del riesgo se pueden tener en cuenta alguna de las siguientes opciones, las cuales pueden considerarse cada una de ellas independientemente, interrelacionadas o en conjunto.

Evitar el riesgo. Es siempre la primera alternativa a considerar. Se logra cuando al interior de los procesos se genera cambios sustanciales por mejoramiento, rediseño o eliminación, resultado de unos adecuados controles y acciones emprendidas. Un ejemplo de esto puede ser el control de calidad, manejo de los insumos, mantenimiento preventivo de los equipos, desarrollo tecnológico, etc.

Reducir el riesgo. Si el riesgo no puede ser evitado porque crea grandes dificultades operacionales, el siguiente paso es reducirlo al más bajo nivel posible. La reducción del riesgo es probablemente el método más sencillo y económico para superar las debilidades antes de aplicar medidas más costosas y difíciles. Ésta se consigue mediante la optimización de los procedimientos y la implementación de controles. Ejemplo: Planes de contingencia.

Dispersar y atomizar el riesgo. Se logra mediante la distribución o localización del riesgo en diversos lugares. Es así como por ejemplo, la información de gran importancia se puede duplicar y almacenar en un lugar distante y de ubicación segura, en vez de dejarla concentrada en un solo lugar.

Transferir el riesgo. Hace referencia a buscar respaldo y compartir con otro parte del riesgo como por ejemplo tomar pólizas de seguros; se traslada el riesgo a otra parte o físicamente se traslada a otro lugar. Esta técnica es usada para eliminar el riesgo de un lugar y pasarlo a otro o de un grupo a otro. Así mismo, el riesgo puede ser minimizado compartiéndolo con otro grupo o dependencia.

Asumir el riesgo. Luego de que el riesgo ha sido reducido o transferido puede quedar un riesgo residual que se mantiene, en este caso el gerente del proceso simplemente acepta la pérdida residual probable y elabora planes de contingencia para su manejo.

Una vez establecidos cuales de los anteriores manejos del riesgo se van a concretar, estos deben evaluarse con relación al beneficio-costos para definir, cuales son susceptibles de ser aplicadas y proceder a elaborar el plan de manejo de riesgo, teniendo en cuenta, el análisis elaborado para cada uno de los riesgos de acuerdo con su impacto, probabilidad y nivel de riesgo.

Posteriormente se definen los responsables de llevar a cabo las acciones especificando el grado de participación de las dependencias en el desarrollo de cada una de ellas. Así mismo, es importante construir indicadores, entendidos como los elementos que permiten determinar de forma práctica el comportamiento de las variables de riesgo, que van a permitir medir el impacto de las acciones.

1.3.1.6. Monitorear y revisar Una vez diseñado y validado el plan para administrar los riesgos, es necesario monitorearlo permanentemente teniendo en cuenta que estos nunca dejan de representar una amenaza para el proyecto, el monitoreo es esencial para asegurar que dichos planes

permanecen vigentes y que las acciones están siendo efectivas. Evaluando la eficiencia en la implementación y desarrollo de las acciones de control, es esencial adelantar revisiones sobre la marcha del plan de manejo de riesgos para evidenciar todas aquellas situaciones o factores que pueden estar influyendo en la aplicación de las acciones preventivas.⁷

El monitoreo se realiza durante todo el proceso y consiste en revisar el desempeño del sistema de administración de riesgos a través de indicadores de modo que cumplan todas las etapas y se logren los objetivos propuestos. Adicionalmente, en esta etapa también se debe diseñar un sistema que permita atender la aparición de nuevos riesgos, hacer seguimiento a los riesgos identificados y a la efectividad de las estrategias de mitigación implantadas. Además, realizar un monitoreo de los responsables en la organización de cada riesgo, y a medida que se repite el ciclo, aumentar el alcance y la efectividad del sistema de gestión de riesgos.

Es necesario monitorear los riesgos, la efectividad del plan de tratamiento de los riesgos, las estrategias y el sistema de administración que se establece para controlar la implementación. Los riesgos y la efectividad de las medidas de control necesitan ser monitoreadas para asegurar que las circunstancias cambiantes no alteren las prioridades de los riesgos. Pocos riesgos permanecen estáticos.

Es esencial una revisión sobre la marcha para asegurar que el plan de administración se mantiene relevante. Pueden cambiar los factores que podrían afectar las probabilidades y consecuencias de un resultado, como también los factores que afectan la conveniencia o costos de las distintas opciones de tratamiento. En consecuencia, es necesario repetir regularmente

⁷ Guía Administración del Riesgo. Departamento administrativo de la función pública. Bogotá. 2004. p. 29.

el ciclo de administración de riesgos. La revisión es una parte integral del plan de tratamiento de la administración de riesgos.

1.3.1.7. Comunicar y consultar La comunicación y consulta son una consideración importante en cada paso del proceso de administración de riesgos. Es importante desarrollar un plan de comunicación para los interesados internos y externos en la etapa más temprana del proceso. Este plan debería encarar aspectos relativos al riesgo en sí mismo y al proceso para administrarlo.

La comunicación y consulta involucra un diálogo en ambas direcciones entre los interesados, con el esfuerzo focalizado en la consulta más que un flujo de información en un sólo sentido del tomador de decisión hacia los interesados. Es importante la comunicación efectiva interna y externa para asegurar que aquellos responsables por implementar la administración de riesgos, y aquellos con intereses creados comprenden la base sobre la cual se toman las decisiones y por qué se requieren ciertas acciones en particular.

Las percepciones de los riesgos pueden variar debido a diferencias en los supuestos, conceptos, las necesidades, aspectos y preocupaciones de los interesados, según se relacionen con el riesgo o los aspectos bajo discusión. Los interesados probablemente harán juicios de aceptabilidad de los riesgos basados en su percepción de los mismos. Dado que los interesados pueden tener un impacto significativo en las decisiones tomadas, es importante que sus apreciaciones de los riesgos, así como de los beneficios, sean identificadas y documentadas y las razones subyacentes para las mismas sean comprendidas y tenidas en cuenta.⁸

⁸ Administración de riesgos. Estándar Australiano. 1999. p. 19.

La forma de reportar los riesgos es importante, ya que las personas encargadas de tomar decisiones y los grupos de interés a quienes se presenta la información deben hacerse una idea clara acerca del nivel de exposición real del proyecto, en lo relacionado con incidentes, impacto financiero, o pérdida de imagen, entre otras posibilidades.

1.4. PROCESO DE TOMA DE DECISIONES

La gestión de riesgo y análisis de decisiones de inversión bajo condiciones de incertidumbre es una disciplina que se ha manejado de una manera tímida en el pasado, a pesar de que ha presentado una serie de adelantos en los últimos años principalmente en la industria petrolera, como respuesta a la creciente necesidad de optimizar la asignación de recursos de capital.

En la práctica es casi imposible pretender que las decisiones empresariales e incluso las personales, se tomen de manera completamente objetiva. No es lo mismo tomar una decisión luego de una serie de fracasos consecutivos, que cuando se tiene el panorama despejado y se cuenta con el capital y el apoyo suficiente. Se debe tener claro que la toma de decisiones en condiciones de incertidumbre implica considerar la información y alternativas disponibles al momento de adelantar el proceso, ya que una vez ocurren los eventos objeto del análisis, es posible considerar que la decisión que se debió tomar es diferente a la que finalmente se adoptó.

El proceso de toma de decisiones debe seguir las siguientes etapas:

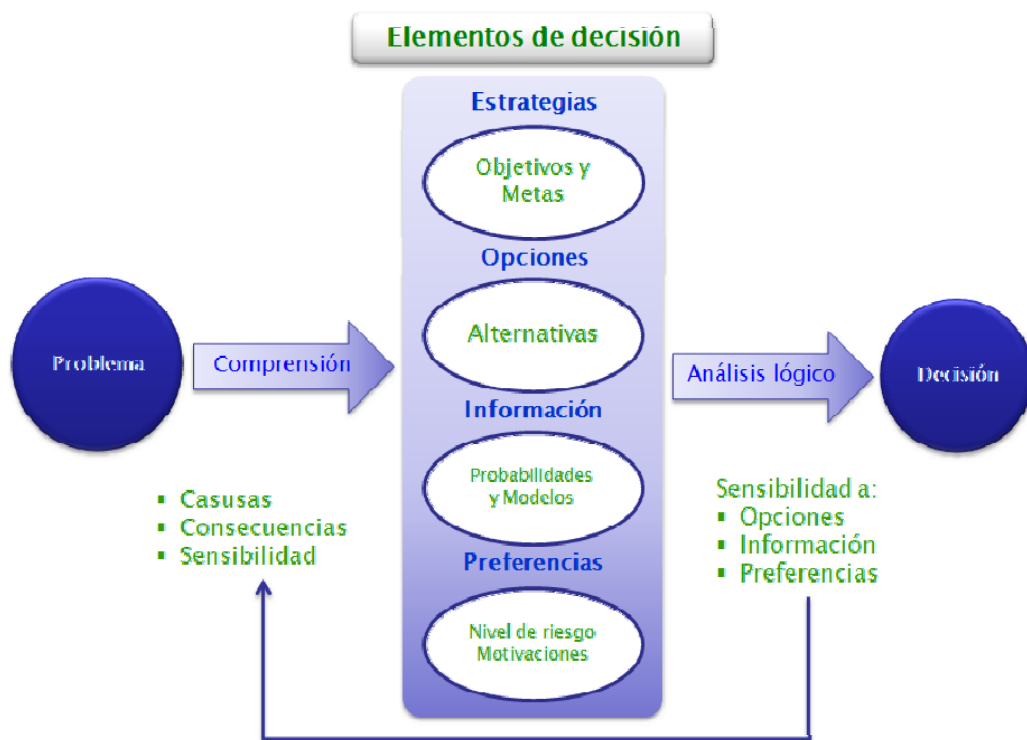
- Definir el problema

- Comprensión de las causas y consecuencias

- Evaluación de la situación
- Refinamiento del análisis realizado
- Toma de decisiones

La *Figura 3*, muestra una metodología sistemática para el proceso de toma de decisiones que se adopta y se adapta para reflejar la importancia de una estrategia.

Figura 3: Proceso de toma de decisiones.



Fuente: Modificado. Gestión integral de Riesgos. BRAVO, Oscar. 2007

En primer lugar se requiere identificar claramente el problema para poder asociar la decisión a la estrategia del proyecto, reflejado en las metas, objetivos e indicadores de gestión. Una vez seleccionada una alternativa y un curso de acción para la situación, es importante realizar un análisis de sensibilidad que se da como complemento a los modelos que se desarrollan para lograr una mejor comprensión del escenario analizado y para reevaluar el problema e implementar la mejor alternativa. En el evento que surjan alternativas adicionales que pudieran modificar la decisión adoptada, el proceso se debe ajustar para incorporar las nuevas posibilidades existentes, por lo que se debe actualizar el modelo y los elementos utilizados para el análisis, para al final revisar si se cambiaría la decisión como consecuencia de la existencia de una nueva alternativa de mitigación del riesgo que no se consideró inicialmente.

Pero únicamente con identificar y medir los riesgos no se garantiza que se minimicen las pérdidas y se maximicen las oportunidades. Se requiere de un adecuado proceso de toma de decisiones que se complemente con una gestión de riesgos efectiva, y así se logre una mayor generación de valor para el proyecto, lo que en caso de realizarse de forma sistemática y consistente permitirá generar una importante ventaja competitiva.

En el caso de un proyecto, al utilizar las herramientas disponibles es posible analizarlo en detalle, y con ello lograr los siguientes beneficios:

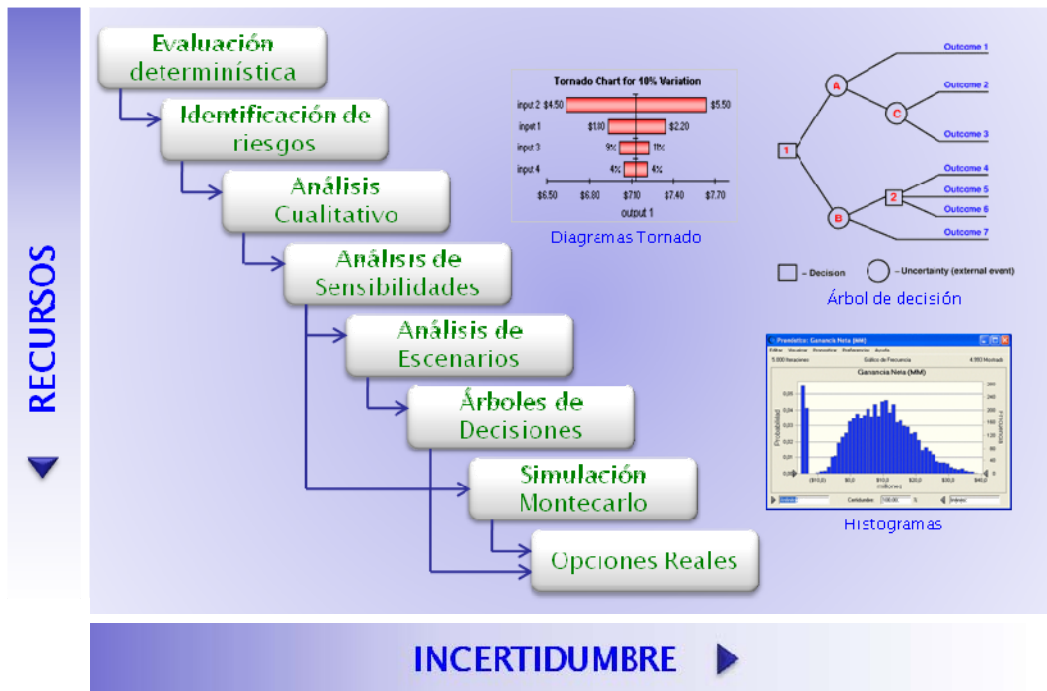
- Conocer los pormenores del proyecto, mediante la comprensión de de sus supuestos, realidades y expectativas, con lo que se puede adelantar una evaluación más efectiva.

- Identificar y medir las variables críticas que lo afectan, y con ello facilitar la labor de dirección y control durante su ejecución.
- Detectar errores en las variables y supuestos que se están analizando en la evaluación, y con ello evitar el uso de pronósticos excesivamente conservadores u optimistas.
- Brindar una herramienta al equipo del proyecto que le permita tomar decisiones sobre la ejecución, gracias a la posibilidad de construir escenarios que posibiliten el contestar el interrogante ¿Qué pasa si?
- Medir la probabilidad en que se alcancen las metas: VPN, producción, ejecución de actividades, etc.

Independientemente de la naturaleza del proyecto a evaluar, es importante entender las incertidumbres asociadas a su ejecución, especialmente si para su desarrollo se requiere gran cantidad de recursos. De ahí que sea tan importante tener una valoración completa de los riesgos, ya que es necesario conocer si se está en capacidad de absorberlos o controlarlos, y lo que se debe pagar por ello.

Existen etapas que se deben cubrir con el fin de llevar a cabo la valoración de riesgo y la toma de decisiones de una situación analizada. Es importante tener claro que no todo proyecto requiere de un análisis exhaustivo; el nivel de detalle del análisis dependerá del grado de complejidad, la importancia estratégica y la magnitud de recursos requeridos. La *Figura 4*, muestra las etapas que se deben realizar para conseguir la medición del riesgo de un proyecto u oportunidad de negocio. La razón de su creciente importancia es que además de la posibilidad de entender una oportunidad y poder visualizar sus factores críticos de éxito, permiten determinar el riesgo total asociado.

Figura 4: Etapas en la evaluación de un proyecto



Fuente: Modificado. Gestión integral de Riesgos. BRAVO, Oscar. 2007

La gráfica muestra que por ejemplo, en el evento en que los recursos necesarios para la realización del proyecto no sean muy grandes, el análisis cualitativo es suficiente. Si por el contrario, se requiere de un análisis cuantitativo, la decisión de qué tipo de herramienta se debe utilizar depende del grado de incertidumbre, nivel de recursos, etc. De aquí que no todo proyecto requiera de un análisis de opciones reales, únicamente se justifica su utilización en situaciones de alta incertidumbre y donde se requieran altos recursos para su utilización.

2. DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS QUE IMPLICAN RIESGO E INCERTIDUMBRE EN LA EVALUACIÓN ECONÓMICA EN PROYECTOS DE INYECCIÓN DE VAPOR

Cada proyecto u oportunidad de negocio es único, por lo que tiene parámetros que implican incertidumbres específicas adicionales en circunstancias particulares y deben ser tenidas en cuenta. El análisis económico de un proyecto de inyección de vapor tiene especial importancia, ya que requiere una alta inversión y además conlleva altos costos de operación y desarrollo. La necesidad de analizar y evaluar estos proyectos, se origina fundamentalmente, en la búsqueda de la maximización del rendimiento y es aquí donde surge el análisis de riesgo e incertidumbre asociado con su implementación.

Uno de los problemas más grandes que enfrenta el analista tiene que ver con la identificación de los riesgos a los que está expuesto el proyecto o la situación particular, ya que en muchas ocasiones, sea por omisión o por ignorancia sobre la forma de medirlos, los riesgos no se incluyen dentro de la evaluación correspondiente, de ahí que se presenten problemas a la hora de analizarlos. Por esta razón es necesario identificar y definir los parámetros asociados a la inyección de vapor antes de entrar a evaluarlos y cuantificarlos.

2.1. CARACTERIZACIÓN DEL RIESGO

El proceso de caracterización consiste en la identificación y comprensión de los riesgos que puedan existir en las diferentes fases del proyecto de

inyección de vapor. Para facilitar su comprensión, hay que tomar en cuenta, que estos poseen dos niveles de riesgo: durante la fase de construcción y posteriormente en la vida futura. Los mayores riesgos se ven concentrados en las etapas iniciales, que es cuando se requieren altas inversiones de capital y se desconoce la rentabilidad que generará el proyecto.

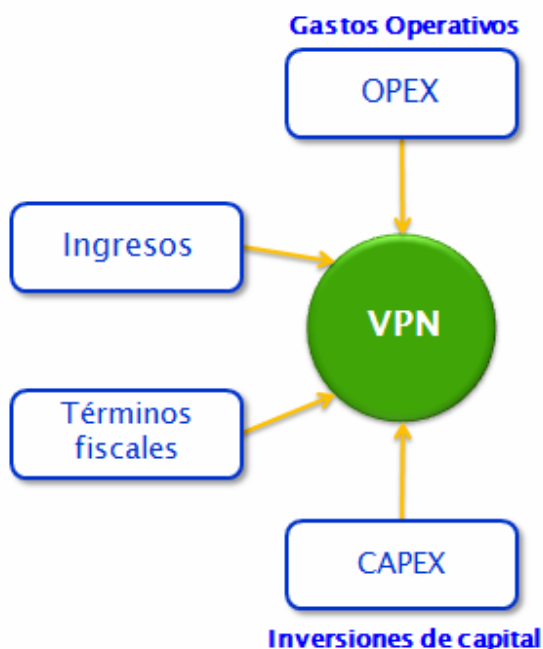
Las etapas que componen dicho proceso son las siguientes:

- Identificar los riesgos y sus posibles impactos.
- Determinar posibles causas.
- Realizar los diagramas de influencia.
- Plantear acciones de mitigación.
- Estimar los costos asociados a la mitigación.

Cuando se identifican riesgos, *Figura 5*, es común que estos se reconozcan a partir del efecto o impacto que puedan tener sobre la generación de utilidades u otro aspecto relevante del proyecto, en este caso, el efecto de variables como: ingresos, términos fiscales, gastos operativos (Opex) e inversiones de capital (Capex), sobre el valor presente neto, VPN.

Por esta razón es importante asociarlos entre sí y con ello contribuir a la caracterización y descripción de los mismos. Es común encontrar que a pesar de que el riesgo tenga un nombre y descripción adecuados, las personas tienden a asociarlo con situaciones que han vivido particularmente y no con el que se pretende analizar.

Figura 5: Diagrama de influencia de variables económicas sobre el VPN.



Fuente: Los Autores.

2.2. IDENTIFICACIÓN DE LOS RIESGOS

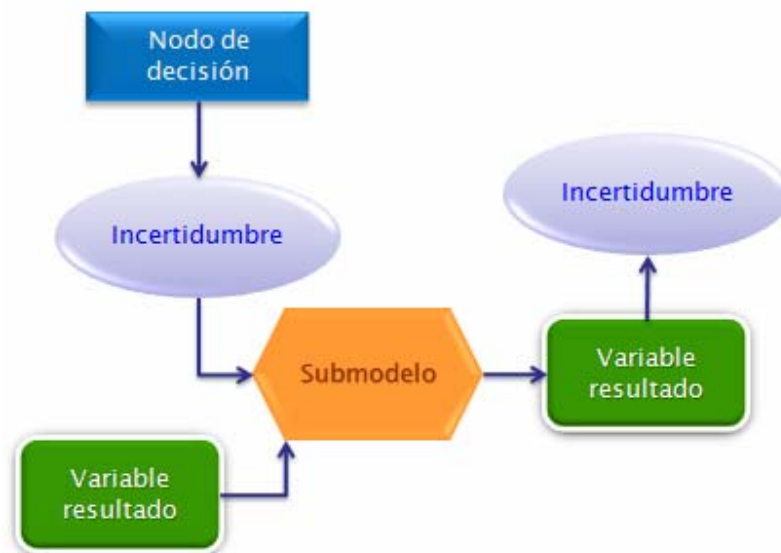
Una cosa es el establecimiento de los riesgos que pueda tener el proyecto para cumplir con sus objetivos trazados, lo cual está asociados los futuros ingresos y costos durante la vida útil del proyecto, y otra, poder identificar los problemas potenciales en que se incurra para poderlo llevar a cabo sin contratiempos que impliquen atrasos y sobrecostos.

Dentro de los procedimientos para identificar los riesgos se encuentran la lluvia de ideas y el método *Delphi*. El método de lluvia de ideas es especialmente utilizado con equipos de trabajo que presentan diferentes niveles de autoridad y experiencia. Lo que se busca es la generación de la mayor cantidad posible de ideas o identificación de riesgos partiendo del

principio del pensamiento divergente. El método *Delphi* es un poco más estructurado. Consiste en un proceso interactivo en el que se pregunta a expertos sobre sus pronósticos de futuro hasta llevarlos a un consenso sobre un aspecto determinado.

Otra manera de caracterizar el riesgo, es mediante los **diagramas de influencia**. Un diagrama de influencia, *Figura 6*, es una forma gráfica de modelar un sistema. Lo primero que se debe hacer es identificar todos los componentes que ejercen alguna influencia en el funcionamiento del sistema y la interacción entre ellos. El diagrama de influencia sirve para modelar sistemas en que la variación o introducción de un elemento afecta sobre la cantidad o presencia de otro elemento.

Figura 6: Esquema del diagrama de influencia.



Fuente: Los Autores.

Las flechas dentro del diagrama muestran las relaciones de causalidad, donde los símbolos utilizados significan:

- El rectángulo es un nodo de decisión.
- El hexágono es un submodelo.
- El óvalo es una incertidumbre.
- El rectángulo redondeado es una variable resultado.

Los diagramas de influencia permiten representar problemas de decisión, tal y como los percibe el decisor: *incertidumbre, acciones a tomar y preferencias*.

Estos se constituyen en una herramienta útil para reflejar incertidumbres, sus causalidades e impactos; incluyen diferentes cursos de acción a tomar y la forma en que las decisiones que se puedan tomar afectan los resultados.

No a todo el mundo le gusta utilizar los diagramas de influencia. Sin embargo sus defensores opinan que ayudan a estructurar los problemas en condiciones de incertidumbre, porque facilitan la comprensión de la situación global a analizar.

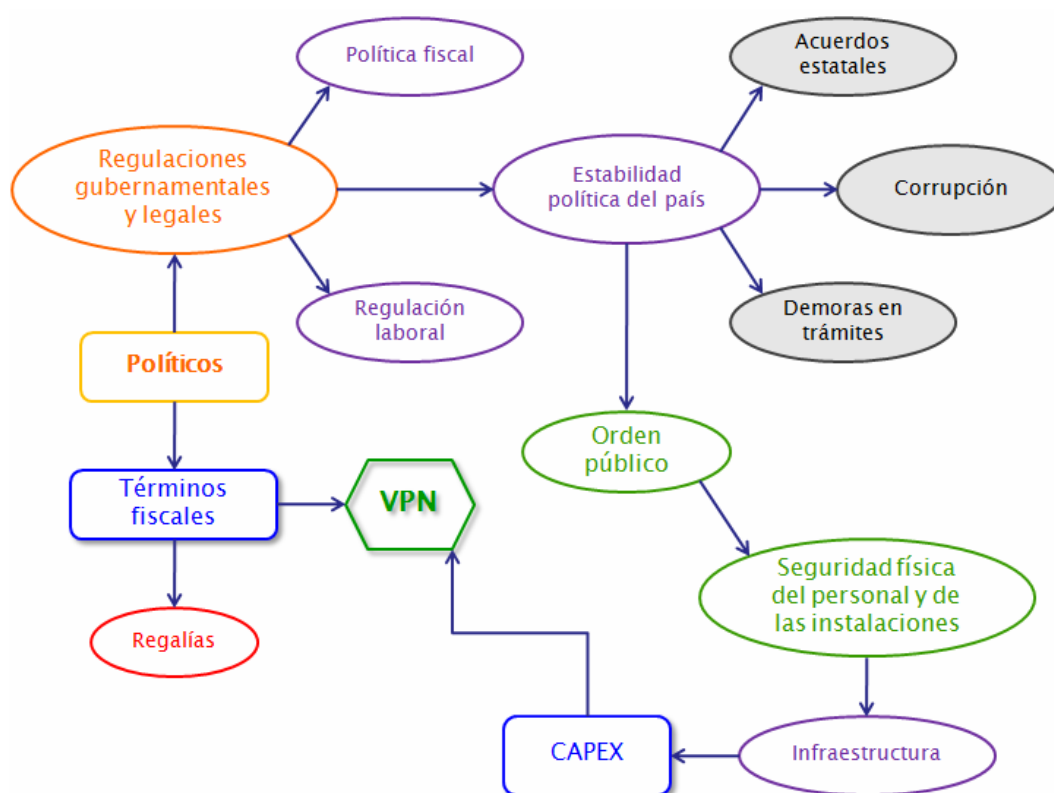
2.3. CLASIFICACIÓN DE LOS RIESGOS

Después de analizar las variables asociadas a la evaluación económica de proyectos de inyección de vapor, se encontraron una serie de riesgos relacionados al mismo; y tal como se definió en el capítulo anterior, al momento de identificarlos, es preciso clasificarlos en tres categorías: de entorno, financieros y atrasos en ejecución.

2.3.1. RIESGOS DE ENTORNO Este tipo de riesgo tiene en cuenta los aspectos más relevantes del entorno y la forma en que pueden afectar la

viabilidad futura, *Figura 7*. Aquí se reconocen grandes factores que es necesario tener en cuenta cuando se planea discutir un proyecto, entre ellos están, los políticos, los económicos, los sociales y los ambientales.

Figura 7: Diagrama de influencia. Riesgos de entorno políticos.



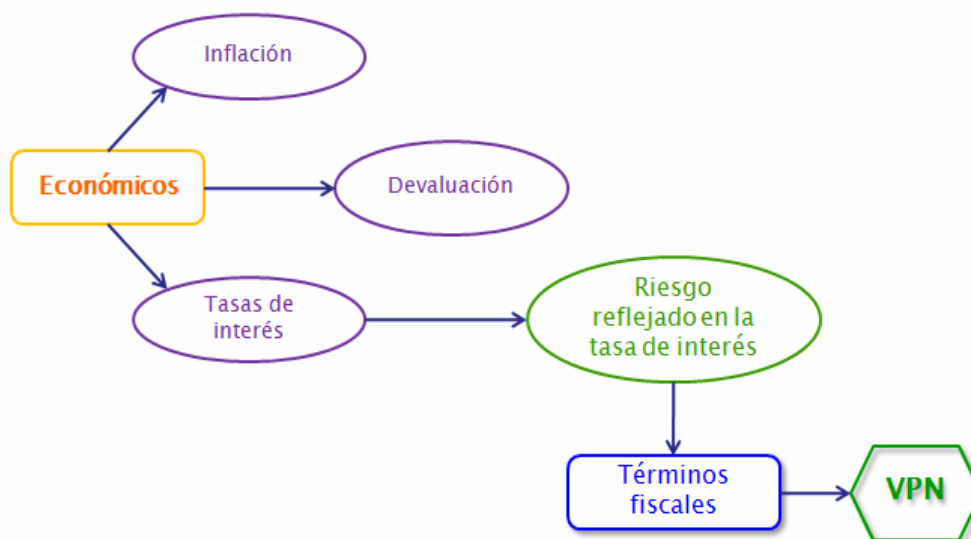
Fuente: Los Autores.

En los factores políticos encontramos regulaciones gubernamentales y legales, ejemplo de esto son la política fiscal, la regulación laboral y la estabilidad política del país. Estas variables pueden modificar la decisión de inversión para un proyecto, ya que puede verse afectado por cambios en las reglas del juego en materia fiscal y el manejo de regalías. En cuanto a la situación política del país, hay que comprender las posibilidades de nacionalización de la industria, cambio en la estabilidad política de la nación,

corrupción, demoras en los trámites y falta de cumplimiento de los acuerdos establecidos a nivel estatal.

En términos económicos, *Figura 8*, existen variables que con frecuencia llegan a afectar considerablemente los retornos esperados del proyecto. Aspectos tales como la inflación, devaluación y tasas de interés son factores que no pueden ser controlados por los encargados del proyecto. En el aspecto social, se pueden producir dificultades como consecuencia de la afectación a comunidades indígenas, etnias, ciertas minorías y la comunidad en general. Los factores ambientales, *Figura 9*, agrupan al conjunto de normas, regulaciones y permisos ambientales requeridos para operar. Cada día se ha vuelto más importante especialmente para industrias extractivas, entre muchas otras.

Figura 8: Diagrama de influencia. Riesgos de entorno económicos.



Fuente: Los Autores.

A continuación se definirán algunos de los riesgos de entorno que mayor incidencia tienen en un proyecto de inyección de vapor.

2.3.1.1. Seguridad Física del personal y de las instalaciones

Durante la realización de proyectos de inyección de vapor se llevan a cabo diversas actividades que pueden ocasionar daño o impactos de alta magnitud al medio ambiente y seguridad del personal, sino son manejadas adecuadamente.

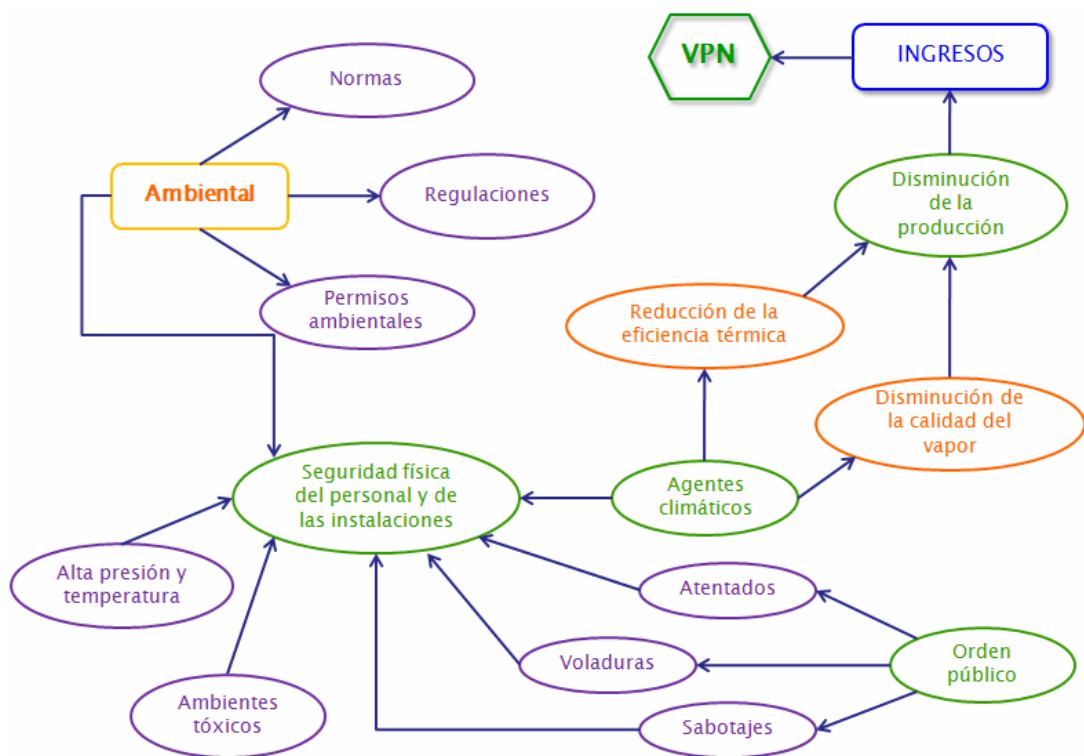
En particular, la presencia de líneas de gas de alta presión, algunas a temperaturas más altas que las encontradas en las operaciones de campo convencionales fueron reconocidas como un potencial riesgo para la seguridad. La presencia de ácido sulfhídrico, una cuestión con la cual la industria ha tenido considerable experiencia, también fue reconocida como un riesgo para la seguridad y la salud. Constantemente el departamento de seguridad industrial realiza chequeos en los niveles de ácido sulfhídrico cercano a los pozos, el cual es bastante notable y presenta un olor característico, además de charlas informativas dirigidas a todo el personal involucrado en la operación para el manejo de ambientes tóxicos y los cuidados básicos a tener cuando se trabaja temperaturas y presiones altas.

La información recopilada durante la caracterización, como por ejemplo, la identificación de áreas con susceptibilidad ambiental, los detalles y diseño técnicos de la infraestructura de los pozos, y la experiencia acumulada durante el desarrollo y producción de pozos, proveerá los datos necesarios para realizar una evaluación adecuada de riesgos para el proyecto de inyección de vapor.

Una vez que se identifican los riesgos, se deben evaluar y programar medidas de control de pérdidas que incluyan procedimientos de seguridad

fiables, planes que minimicen las pérdidas o los daños y planes de recuperación de desastres y los procedimientos para asegurarse de que las instalaciones puedan recuperarse rápidamente de los efectos de la pérdida o desastre para seguir operando.

Figura 9: Diagrama de influencia. Riesgos de entorno ambiental y políticos.



Fuente: Los Autores.

2.3.1.2. Orden público En un mercado tan competitivo como el actual, se ha convertido en una prioridad para las industrias, sobre todo para el sector de los hidrocarburos, evitar que se produzcan amenazas o riesgos de orden público llegando a afectar condiciones de operación que no se habían previsto.

En muchos casos los problemas de orden público se reflejan en mayores sobrecostos del proyecto, ocurren circunstancias en las que, a causa de voladuras, saboteos y atentados en contra de las instalaciones (puentes, equipos, torres eléctricas, oleoductos, facilidades de producción) y situaciones diversas, se deba restringir o suspender la producción total o parcialmente, lo cual conllevaría a una reducción no considerada en los ingresos, afectando la rentabilidad y desarrollo del proyecto.

2.3.1.3. Agentes climáticos Uno de los factores que tiene gran influencia en la ejecución y desarrollo de proyectos de inyección de vapor, es el clima. En temporadas de lluvia, las operaciones se ven afectadas debido a que las bajas temperaturas aumentan la transferencia en las líneas que conducen el vapor; por lo tanto, se reduce la calidad del vapor y la eficiencia térmica. A esto se suma la posibilidad de pérdida del fluido eléctrico ocasionado por tormentas, generando paradas inesperadas de equipos y disminución de la producción, además de daños en las vías de acceso. Por otro lado, en épocas de verano, el mayor problema se presenta con el servicio de energía eléctrica, debido a que las hidroeléctricas no cuentan con el caudal de agua suficiente para generar electricidad y abastecer la demanda.

2.3.1.4. Impacto ambiental de emisiones y vertimientos Estos factores revisten cada vez de mayor importancia, debido a que se pueden presentar situaciones en las que se afecta la producción, incluso el cierre del campo, como consecuencia de demoras en la consecución de permisos ambientales para adelantar obras. Los problemas de seguridad son generados por derrame de hidrocarburos, fugas de vapor a muy altas temperaturas, inconvenientes con el vertimiento de aguas producidas o gases venteados a la atmósfera.

Debido al gran número de restricciones legales, se debe hacer un adecuado tratamiento de las corrientes de desecho, además del reacondicionamiento que se debe realizar en la superficie de los trabajos realizados. En la emisión de gases en los pozos productores se debe tener especial cuidado con el sulfuro de hidrógeno, el monóxido de carbono y los hidrocarburos en el gas producido.

Como personas y compañías responsables, hay un notable interés en mantener e incluso mejorar la calidad del medio ambiente. La evolución de exigentes requerimientos legales ha sumado un mayor incentivo a desarrollar procesos de bajo costo para disposición de corrientes de desecho y reacondicionar la superficie de la tierra en una forma socialmente aceptable cuando un proyecto es finalizado.

2.3.1.5. Riesgo reflejado en la tasa de descuento La forma de poder establecer la conveniencia económica de adelantar una oportunidad de negocio o de mejora, es a partir de la definición de un factor que permita medir el monto de la inversión que se va a realizar, contra los beneficios que se esperan recibir. El umbral que lo permite es la tasa de descuento, la cual se aplica a los flujos de caja esperados por la oportunidad evaluada.

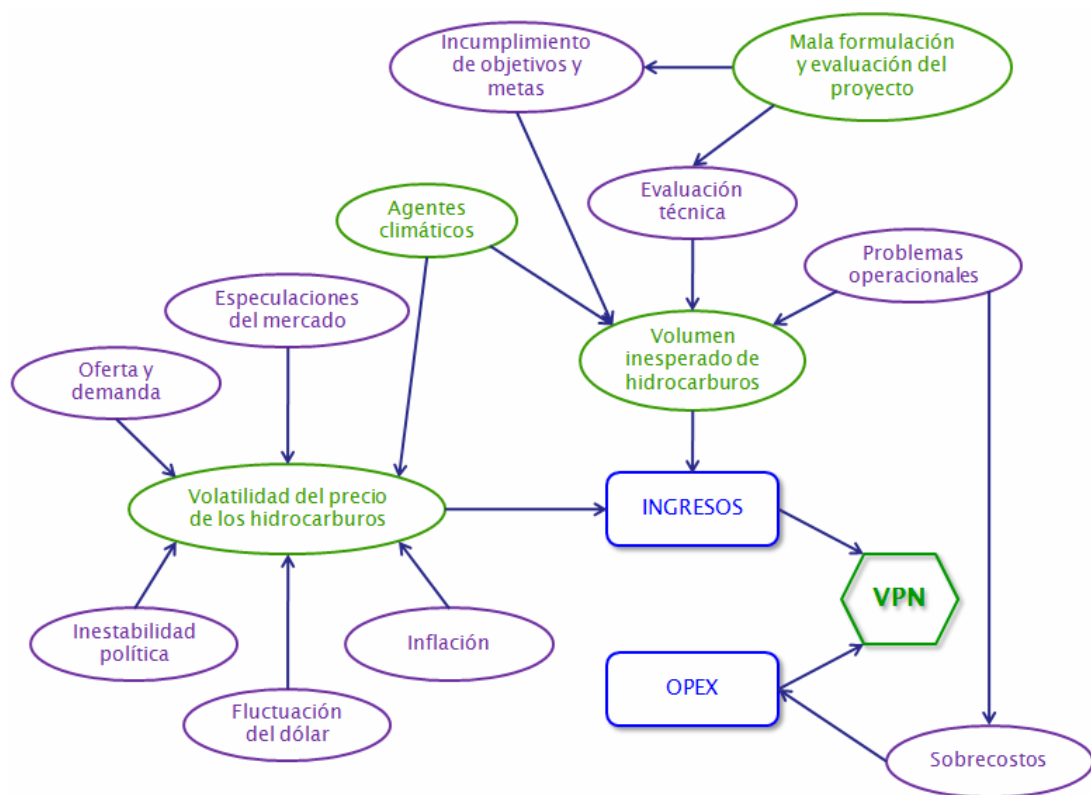
El riesgo de una alta tasa de descuento, se ve reflejado en el cálculo del valor presente, ya que los flujos de caja de largo plazo se verán severamente disminuidos, debido al componente geométrico del denominador, En consecuencia, el uso de altas tasas afecta proyectos estratégicos y de largo plazo a favor de otros a corto plazo.

El riesgo que representa las oscilaciones en las tasas de interés, se encuentra clasificado como un riesgo de entorno comercial o económico,

basado en los cambios de las variables macroeconómicas del proyecto; sin embargo, se puede catalogar como riesgo financiero.

2.3.2. RIESGOS FINANCIEROS Los riesgos financieros son más difíciles de predecir, debido a que generalmente no se pueden controlar por los encargados del proyecto; entre ellos se destaca la volatilidad de los precios de los hidrocarburos, ya que como se puede observar en la *Figura 10*, tiene un impacto directo sobre los ingresos, y por ende sobre el VPN.

Figura 10: Diagrama de influencia. Riesgos financieros.



Fuente: Los Autores.

Hay que considerar, que al ejecutar las inversiones necesarias tanto para la construcción e implementación, como para la fase de desarrollo del proyecto,

es posible que se presenten sobrecostos y desviaciones con respecto al presupuesto inicial, como consecuencia de mayores precios en los materiales, equipos, imprevistos, etc. El énfasis de su análisis se debe a la habilidad de poder llevar los resultados al flujo de caja como medio para estimar el riesgo total del proyecto, una vez sea asignada la cantidad de recursos necesarios a los riesgos que más lo ameritan. Es por esto, que necesitan de un manejo cuidadoso debido a que determinan la viabilidad del proyecto y aseguramiento de la inversión.

2.3.2.1. Mala formulación y evaluación del proyecto Para realizar un proyecto de inyección de vapor se deben tener en cuenta ciertos factores que afectan directamente el proceso, así como las características que deben estar presentes en el yacimiento y en la operación, para que el proyecto sea exitoso y los resultados sean idóneos.

La correcta definición, evaluación y gestión del proyecto de inyección de vapor determina el éxito o fracaso en el logro de los objetivos propuestos y por ende en la generación de beneficios. La formulación y gestión adecuada de un proyecto de este tipo, requiere conocer los aspectos relacionados con la formulación adecuada, las áreas y herramientas disponibles para su administración y los aspectos del entorno que determinan los resultados obtenidos en la ejecución del mismo. La correcta formulación, definición del alcance, así como la ejecución de actividades de planeación, control y cierre, inciden en los beneficios que salen de la ejecución de un proyecto de inyección de vapor.

Durante la realización del proyecto aparecen situaciones que amenazan la finalización del mismo. Esto sugiere una administración del riesgo asociado a los factores que afectan al proyecto y que permitan anticipar las medidas

necesarias para minimizar el impacto negativo que puedan tener sobre los resultados esperados.

Es por esto, que la gestión y evaluación de proyectos de inyección de vapor deben ir enfocadas hacia la planificación de actividades, programarlas y luego mientras se está en el proceso de ejecución controlar dichas actividades. Pero específicamente, consiste en mantener tres factores bajo control, ellos son: tiempo, costo y alcance; esto con el fin de mantener una buena administración del mismo para sortear las diferentes situaciones que se presenten, y además garantizar el cumplimiento de los objetivos dentro de los tiempos estipulados.

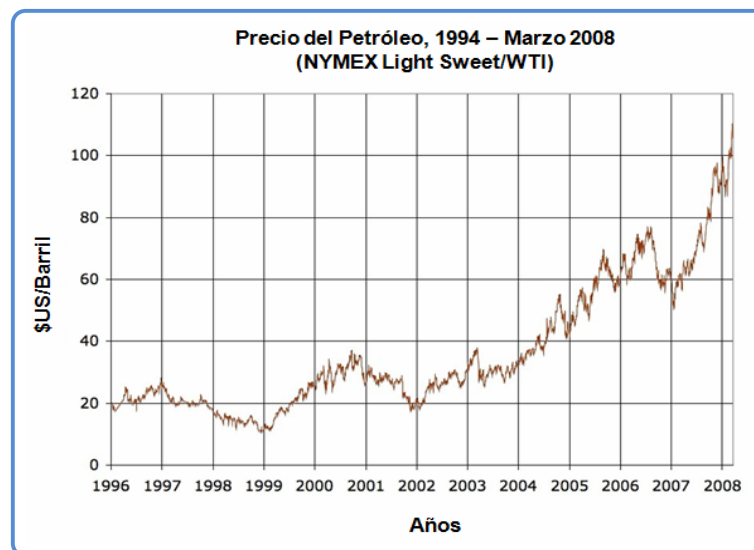
2.3.2.2. Volatilidad del precio de los hidrocarburos La volatilidad del precio del crudo implica un riesgo para la economía mundial y por tanto para el desarrollo e implementación de los diversos métodos de recobro mejorado, tal es el caso de la inyección de vapor. A lo largo de la historia el precio del crudo nunca se ha mantenido estable y esta a la par de los acontecimientos que marquen la historia de la humanidad, en la *Figura 11*, se muestra la variación del precio del crudo WTI variedad liviano dulce en los últimos años.

El precio del crudo WTI muestra alta variación debido a múltiples factores como la inestabilidad política, la situación económica mundial, agentes climáticos y particularmente debido a la inflación y fluctuación del dólar; lo que repercute en una alta incertidumbre sobre el valor futuro de las cotizaciones de crudo. Para la fijación del precio del petróleo, concurren numerosos factores; estos los podemos agrupar como técnicos, económicos y políticos.

Los aspectos técnicos se refieren principalmente al carácter de recurso natural esencial y agotable del petróleo, así como a sus características

físicas. Hay que tener en cuenta que el crudo se valora inicialmente dependiendo de su sitio de origen y el mercado en que se va a negociar o entregar, seguidamente se cotiza según algunas propiedades físicas y químicas que a la larga determinan su precio, la primera es la gravedad API y la segunda es el contenido de azufre. De acuerdo a la primera, se determina si el crudo es liviano, medio, pesado o extrapesado; y de acuerdo a la segunda, se valora como dulce si el contenido de H₂S y CO₂ es menor al 0.5 %, y ácido si sobrepasa el 0.5 %. Los aspectos económicos se refieren fundamentalmente a las condiciones de mercado, a la situación económica internacional, especialmente a la inflación y la fluctuación del dólar.

Figura 11. Variación del precio del crudo WTI en los últimos años.



Fuente: Tomado y adaptado de Wikipedia.org

La constante fluctuación del dólar ha sido otro factor altamente considerado por la OPEP para la fijación del precio del crudo. Como consecuencia de la recesión económica mundial y particularmente de los problemas económicos

al interior de los Estados Unidos, el dólar, moneda con la cual se fija el precio del crudo, ha estado sometido a constantes fluctuaciones y ha sufrido una devaluación frente a otro tipo de monedas. Lo anterior supone, que al momento de generar escenarios, es de gran importancia manejar de forma consistente la proyección de las variables macroeconómicas que afectan la oportunidad de negocio en el futuro.

Los aspectos políticos expresan las relaciones de los diferentes agentes del mercado, países productores OPEP, compañías y estados consumidores, y reflejan la decisión de que los precios del petróleo deben estar en función del desarrollo económico de los países OPEP.

Todos estos factores y sus impactos son cada vez más frecuentes, lo que ha obligado a tomar medidas para la medición y mitigación de los riesgos.

2.3.2.3. Caracterización inadecuada del yacimiento Con la caracterización de un yacimiento se busca obtener un modelo que permita comprender la dinámica del yacimiento. Esto garantiza la realización de predicciones acerca de la respuesta del yacimiento frente a determinadas situaciones y así se pueda tener una base sobre la cual se puedan tomar decisiones.

Hay que tener en cuenta, que la no uniformidad del yacimiento debido a intercalaciones de arcilla, presencia de capa de gas, fracturas en la formación, acuíferos, estratos de muy baja saturación de crudo y alta permeabilidad, variaciones grandes de permeabilidad en la zona productora y la pobre continuidad dentro del yacimiento entre inyectores y productores, no permiten que el vapor siga la trayectoria ideal. Sin embargo, durante el estudio técnico del proyecto es factible que se falle en el proceso de asignar cuantitativamente propiedades del yacimiento, y no se reconozca adecuadamente la información geológica y variabilidad espacial. Esto

conlleva a una disminución en los perfiles de producción esperados debido a que se reduce la eficiencia térmica y el factor de recobro, los cuales disminuyen los ingresos del proyecto, afectando considerablemente la rentabilidad y sostenibilidad del mismo.

2.3.2.4. Volumen no esperado de hidrocarburos Es muy difícil poder establecer con algún grado de certidumbre el nivel de ingresos esperado, debido a que este depende del volumen de los hidrocarburos producidos y del precio principalmente.

En todo proyecto petrolero, uno de los problemas más comunes en el proceso de toma de decisiones es el poder pronosticar eventos futuros con precisión. El riesgo frente a la incertidumbre de contar con la producción esperada, se debe a la imposibilidad de garantizar la generación de flujos de caja esperados. La declinación inesperada de la producción debe evaluar la cantidad de pozos que se pueden perforar por año, el espaciamiento, su producción inicial y tasa de declinación. Así como analizar aspectos operacionales como el abandono de pozos por problemas mecánicos, operaciones de mantenimiento de pozos, fallas en el suministro de gas y energía, paradas inesperadas de equipos y disponibilidad de agua para el tratamiento y generación, entre otros.

2.3.2.5. Costos de consumo de gas natural Los costos de mayor incidencia dentro del proceso de inyección cíclica de vapor en su orden de importancia son: costo del gas por MMBTU, costo del generador, costos de recompletamiento y acondicionamiento de pozos, costo de las facilidades de superficie, sistemas de levantamiento artificial y tubería, y por último costo del tratamiento de agua.

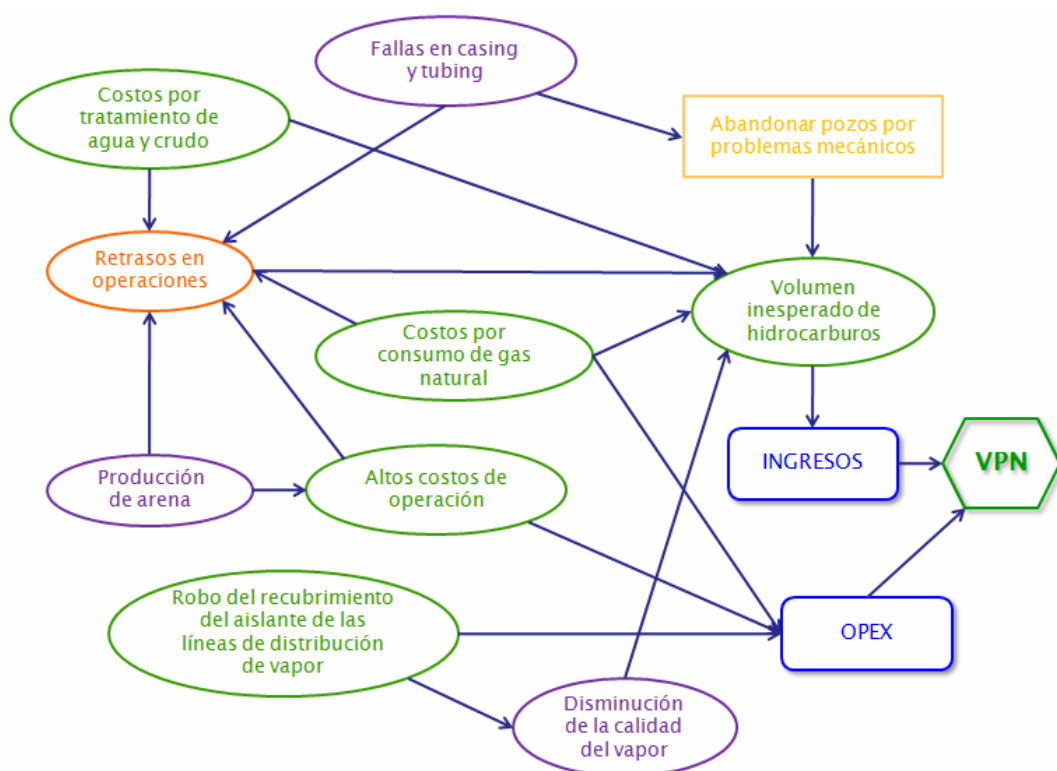
La variable que mayor incidencia tiene en la generación de vapor, sobre el costo por millón de BTU, es el consumo de gas, el cual es aproximadamente el 80% del valor total del costo. El consumo de gas natural varía dependiendo del vapor generado, que es el principal indicador del gas consumido y del costo del gas, que a su vez, está influenciado por el poder calorífico y su proveedor.

2.3.2.6. Costos para tratamiento del crudo y agua Se presenta debido a que se hace necesario tener en cuenta una serie de operaciones para separar el agua, el gas y el sedimento del petróleo que fluye del pozo, consiguiendo las condiciones exigidas por el transportador y por el comprador. Las dificultades para tratar el crudo generan atrasos a la hora de obtener los ingresos proyectados. Los principios básicos del proceso son la recolección y distribución del petróleo, la inyección de químicos antiespumante, desemulsificante e inhibidor de corrosión, la separación del agua libre y gas, el tratamiento térmico y electrostático, el enfriamiento y depuración del gas, el almacenamiento y entrega del petróleo.

El agua producida es reciclada o inyectada en formaciones subterráneas. Si el agua es reciclada, como lo es en proyectos de vapor a gran escala, ésta debe recibir el tratamiento adecuado. El tratamiento de agua consiste, en términos generales, en una serie de procesos químicos cuya finalidad es remover o reducir a niveles aceptables las impurezas presentes en el agua. El manejo inadecuado de este proceso conlleva situaciones de riesgo, ya que puede afectar la recuperación, restando vida útil a los equipos y causando daños a la formación. Los sólidos pueden llegar a taponar la formación y pueden crear escamas en los tubos del generador. Esta escama reduce la transferencia de calor la cual gasta combustible y causa puntos calientes que pueden guiar a un sobrecalentamiento y con posterioridad a una ruptura del tubo.

2.3.2.7. Altos costos de operación La producción de arena es uno de los más extensos y costosos problemas asociados en los proyectos de recobro térmico. En cualquier operación, la arena traída desde el yacimiento por los fluidos producidos puede perjudicar la producción por el llenado del pozo, reducir la producción debido al funcionamiento no adecuado de las bombas de subsuelo, requerir reemplazar equipos a causa de la erosión y demandar costosas operaciones de workover.

Figura 12: Diagrama de influencia. Riesgos financieros. Sobrecostos.



Fuente: Los Autores.

En las operaciones térmicas, cualquier trabajo de pozo (tales como reemplazo de bombas gastadas) y workover, podría requerir enfriamiento al

menos en la inmediata vecindad de la cara del pozo. Las temperaturas reducidas pueden resultar en una reducción temporal en la tasa de producción.

La tubería de revestimiento y de producción en el pozo puede presentar fallas durante el desarrollo de proyectos térmicos debido a varias razones, incluyendo encorvamiento, tensión, erosión, corrosión, y derretimiento. Fallas tales como encorvamiento y tensión usualmente ocurren mientras los pozos calientes se están enfriando, las fallas por erosión están relacionadas directamente con un inadecuado control de la arena.

Debido a las altas presiones que se manejan en el sistema de vapor, ayudado en algunos casos del mal estado de las válvulas de seguridad de los manifolds, se presentan con frecuencia fugas de vapor a lo largo del campo, incrementando así las pérdidas de calor en superficie, y que perjudica directamente la calidad final en la cabeza del pozo, presentándose una expansión térmica en la zona de fuga.

2.3.2.8. Abandonar pozos por problemas mecánicos Dentro de los problemas mecánicos se tienen: las fallas en los revestimientos (*casing*) y en las tuberías de producción (*tubing*), que generalmente se presentan en pozos que fueron utilizados durante la producción en frío y se acondicionaron para formar parte de los patrones de inyección de vapor, porque el completamiento de estos pozos no fue diseñado para soportar los esfuerzos térmicos que se presentan en el material con los incrementos de temperatura. Además, dichos pozos casi siempre son viejos, por tanto su vida útil ha disminuido; otro problema son las fallas en las bombas de subsuelo ubicados en los pozos productores, que son generadas por la producción de arena, entre otras razones.

Reducir estos inconvenientes es costoso y por ende, conducen a la decisión de abandonar un pozo. Sin embargo, esto implica pérdidas de alrededor de US\$ 300.000, razón por la cual tomar la decisión de abandonarlo no deja de ser una situación extrema, toda vez que se superen las etapas de remediación, y se considere que el abandono es más económico que convivir con el problema.

2.3.2.9. Robo del recubrimiento del aislante de las líneas de distribución de vapor El robo del material aislante de las líneas de distribución de vapor es otro factor altamente riesgoso y que puede traer consigo retrasos en operaciones de producción que incurren en una alta exposición de los costos operativos.

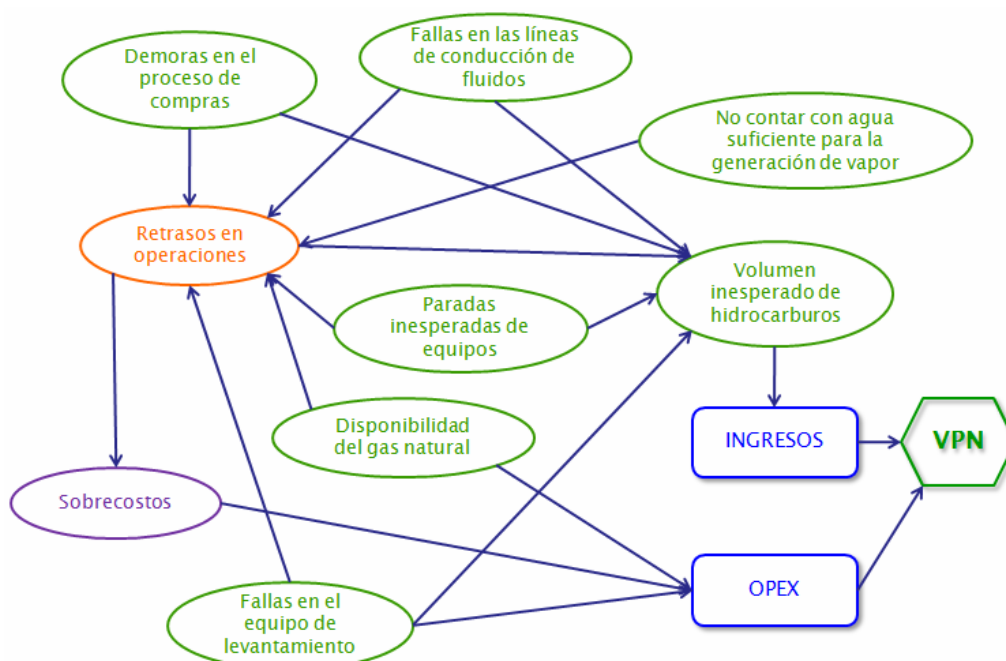
En campo, se encuentran tramos de tubería de vapor en los cuales se nota una falta total o parcial del material aislante, esto debido a que la lamina de aluminio que lo recubre y protege es frecuentemente blanco de robos por parte de habitantes de la zona para ser vendido como material reciclable. Este problema afecta la operación directamente, pues al no haber aislante las pérdidas de calor aumentan considerablemente, sumándose a otros factores que van en contra de la buena calidad del vapor en la cabeza del pozo. El control de los tramos de tubería a lo largo del campo es bastante complicado, pues los pozos están bastante alejados de las zonas centrales tal como el campamento técnico, además al llegar la noche, la seguridad de la zona se hace aun más vulnerable.

2.3.3. RIESGOS POR ATRASOS EN LA EJECUCIÓN Dentro de este grupo de riesgos, *Figura 13*, se consideran principalmente aquellos que impiden lograr los beneficios en el tiempo estimado inicialmente. Se presentan por no considerar los factores que deben tenerse en cuenta en la adecuada realización de la estrategia o cronograma inicial. Se incluyen la

mala planeación, no contar con el personal idóneo, problema en la adquisición de equipos y materiales, demoras en consecución de permisos, problemas operacionales, etc.; lo anterior, genera sobrecostos y reducen el VPN del proyecto.

2.3.3.1. Demoras en el proceso de compra de materiales La mayoría de los proyectos petroleros que se realizan presentan problemas de retrasos en su ejecución, debido a la gran cantidad de incertidumbres que se encuentran en la fase de construcción, o por diversos factores, tales como demora por compra de activos físicos (equipos, plantas e insumos externos); esta variable de riesgo surge como consecuencia de mayores precios en los materiales, equipos, mano de obra e imprevistos en el transporte de la maquinaria.

Figura 13: Diagrama de influencia. Riesgos por atrasos en la ejecución.



Fuente: Los Autores.

Por tal motivo, se busca que el proceso de adquisición de infraestructura sea eficiente y que el suministro de equipos sea óptimo en tiempo y costos. Para esto se deben diseñar acciones relacionadas con los procesos y la tecnología que permitan alcanzar los estándares de calidad deseados, sin afectar los costos de una manera significativa.

Una vez realizado esto, se logrará contar con un proyecto bien estructurado, lo cual implica poseer una administración efectiva de los riesgos durante su construcción. Adicional a la adecuada estructuración, es necesario contar con un equipo suficientemente experimentado y organizado de forma tal, que pueda asegurar la planeación, dirección y control de recursos (personas, equipo, materiales) con el propósito último de lograr las especificaciones técnicas, de costo, y de tiempo del proyecto.

2.3.3.2. Paradas inesperadas de equipos Son muchos los equipos que componen un proceso de inyección de vapor, tales como líneas de superficie, instalaciones eléctricas, sistemas de superficie y pozo, sistema de separación y tratamiento en superficie; cada uno de estos cumple un papel importante en el correcto funcionamiento y eficiencia del proceso, sin embargo estos normalmente se ven expuestos a fallas inesperadas causando desgastes en el sistema de producción y originando inconvenientes costosos en términos de tiempo de reparación y de pérdida de producción.

Para lograr el desempeño óptimo de un proyecto de inyección de vapor, se deben tener en cuenta varios factores, con el fin de que estos sean una ventaja y no un motivo de fracaso o contratiempo que originen fallas imprevistas, paradas inesperadas de equipos y pérdidas económicas. Es por

esto, que para contrarrestar estas fallas se recomienda monitorear el campo paulatinamente, con el fin de detectar y cuantificar el estado de los equipos individualmente, e incluso tomar acciones correctivas cuando ocurra algún malfuncionamiento.

La identificación de alguna anomalía en la operación conlleva al análisis detallado de las causas y se establece un proceso de mitigación de riesgo inmediato para poder continuar con las operaciones. Por ello, las empresas durante el desarrollo de sus proyectos deben garantizar que sus equipos sean seguros y fiables y que no supongan un riesgo operativo.

2.3.3.3. Fallas en el equipo de levantamiento La causa de una reducción en la producción de petróleo puede ser debida a un diseño o aplicación inadecuada del sistema de levantamiento o mal funcionamiento de los equipos. Los pozos térmicos generalmente son producidos por bombeo mecánico, por lo tanto, después de haber sido estimulados con vapor, se deben tener en cuenta ciertas precauciones cuando se bombean, las cuales pueden reducir el rendimiento de la operación e influir notoriamente en la producción de los pozos. Los problemas más comunes que suelen presentarse con los equipos de levantamiento son:

- **Fallas en las varillas y bombas** La causa principal de las fallas en las varillas es el manejo inadecuado de ellas, ya sea durante el transporte y almacenamiento. Además se deben tener en cuenta otros factores como fallas de fabricación y agentes corrosivos presentes. Operacionalmente, las fallas se pueden presentar por rozamiento con la tubería y desgaste por la arena.
- **Fallas en el equipo de superficie** Ocurren debido al diseño que se haya establecido, así como también a fallas en el equipo de subsuelo que

repercuten en el equipo de superficie. Es por esto, que para obviar los problemas en los sistemas de levantamiento, el ingeniero debe basar su diseño sobre las condiciones particulares del pozo y así operar sin mayores contratiempos.

2.3.3.4. Disponibilidad de gas natural El aseguramiento de la cantidad de gas necesaria para la operación de generación, es un factor preponderante en el desarrollo de un proyecto de inyección de vapor. El suministro de gas viene de fuentes externas, es decir, se compra a distribuidores con los cuales se tiene previo contrato. Todos los días se nomina, o se solicita la cantidad de gas necesaria para el siguiente día, dependiendo directamente de los planes que se tengan en cuanto a operación de generadores, etc.

La ausencia de este combustible ocasiona retraso en las operaciones, parada de equipos y disminución en la producción, lo cual genera impactos negativos en las finanzas del proyecto.

2.3.3.5. No contar con el agua suficiente para la generación de vapor Se debe disponer de suficiente y buen tipo de agua para pensar en un proyecto de inyección de vapor. La fuente de abastecimiento puede ser superficial (ríos, lagos), subterránea (pozos profundos) o incluso puede utilizarse la misma agua que produce el yacimiento que va a ser sometido al proceso de inyección de vapor.

Las razones para elegir una u otra fuente son muchas e incluyen consideraciones tales como la calidad, la disponibilidad y seguridad del abastecimiento (si hay fuentes de agua cercanas para generar vapor), costos de construcción y operación del sistema de tratamiento de agua. En cuanto a la disponibilidad, éste, es el principal factor a tener en cuenta para

la generación de vapor, ya que existen factores locales y económicos que pueden restar o aumentar importancia de cada uno de ellos. Por eso es necesario analizar este caso en particular para determinar si es o no favorable inyectar vapor en un determinado campo y así evitar atrasos en ejecución y problemas operativos durante el proceso de inyección.

2.3.3.6. Fallas en las líneas de conducción de fluidos Parte importante en el éxito del proceso de inyección es el cuidado y seguimiento que se les realice a las líneas de conducción de fluidos. Las fallas y deterioro que se presentan, en ocasiones inciden notoriamente en la disminución de las tasas de producción, originándose un problema de tipo económico; ya que de esta manera surgen incrementos en los costos de operación y se producen atrasos en la debida consecución de operaciones.

La mayoría de estos imprevistos surgen debido al desgaste en las líneas, ya que el tendido de las mismas es bastante extenso y contempla tramos de difícil acceso en caso de una reparación o mantenimiento. Por esto, las características de las líneas de superficie son escogidas de acuerdo al tipo de proceso y ambiente, e igualmente las condiciones climáticas prevalecientes en el campo son las que más se tienen en cuenta.

Grandes ahorros económicos en reparaciones futuras y mantenimientos, son generalmente posibles a través de una planeación apropiada y efectiva. El control de dichas fallas hace que estas instalaciones permanezcan útiles a lo largo de la vida del proyecto.

3. METODOLOGÍA PARA ANALIZAR EL RIESGO E INCERTIDUMBRE PRESENTE EN LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DE PROYECTOS DE INYECCIÓN DE VAPOR

En Colombia los yacimientos de crudo pesado están tomando mayor importancia cada día, por lo cual se requiere que el país desarrolle estudios de técnicas para la recuperación de dicho tipo de fluidos entre las que se destaca la inyección de vapor como la más exitosa a nivel mundial. La implementación de estas técnicas requiere estudios compuestos por un componente técnico y un económico.

El Grupo de Investigación de Recobro Mejorado, GRM, en su compromiso de desarrollar proyectos que permitan la transferencia de conocimiento en el área del recobro mejorado, ha desarrollado diferentes trabajos relacionados con la evaluación de la factibilidad técnica y económica de procesos de inyección de vapor.

La evaluación económica es un proceso de gran complejidad que involucra un sin número de variables relacionadas con la naturaleza del proyecto, tales como: la infraestructura, los ingresos, los costos de operación y mantenimiento, los impuestos y otros. El impacto económico que tiene cada variable, depende de la magnitud y condiciones bajo las cuales se va a desarrollar la inyección de vapor.

Dada la importancia de evaluar este tipo de proyectos, se desarrolló una herramienta software, denominada SVEPI, Software de Viabilidad Económica de Proyectos de Inyección. Esta herramienta integra una metodología permite realizar una evaluación económica de un proyecto de inyección de

vapor, en la cual se integran las variables involucradas en la generación, tratamiento y transporte de vapor, con los métodos de evaluación de proyectos de inversión como son el valor presente neto (VPN), las tasas de rendimiento económico (Tasa interna de retorno (TIR) y Tasa promedio de retorno (TPR)) y el tiempo de recuperación de la inversión o payback time, los cuales, facilitan el análisis económico que determinarán la viabilidad de implementar un proyecto de este tipo.

La metodología inicial se planteó de forma totalmente determinística debido a que no considera la evaluación del riesgo y la incertidumbre. Por ello se propone una modificación, que consiste en incorporar a la evaluación económica, el análisis de riesgo e incertidumbre asociado a un proyecto de inyección de vapor; ya que una vez realizada la evaluación económica, se determina la probabilidad que tiene el proyecto de ejecutarse como se planeó y se evaluó, a partir del nivel de certidumbre.

Desde una perspectiva financiera, el aporte surge con la búsqueda de la maximización del rendimiento. Analizar y evaluar estos proyectos, obliga a destinar recursos solo a aquellos que ofrecen el mayor beneficio, y que a la hora de tomar la decisión de invertir, presenten un alto grado de certeza de que su desarrollo arrojará resultados positivos.

En la *Figura 14*, se presenta de manera esquemática la metodología a seguir, donde los datos ingresados por el usuario corresponden a la selección del proceso, la inversión inicial, los ingresos y los egresos. El flujo de caja pertenece al procesamiento de la información, y se realiza la evaluación económica, el análisis de riesgo e incertidumbre y una presentación de resultados.

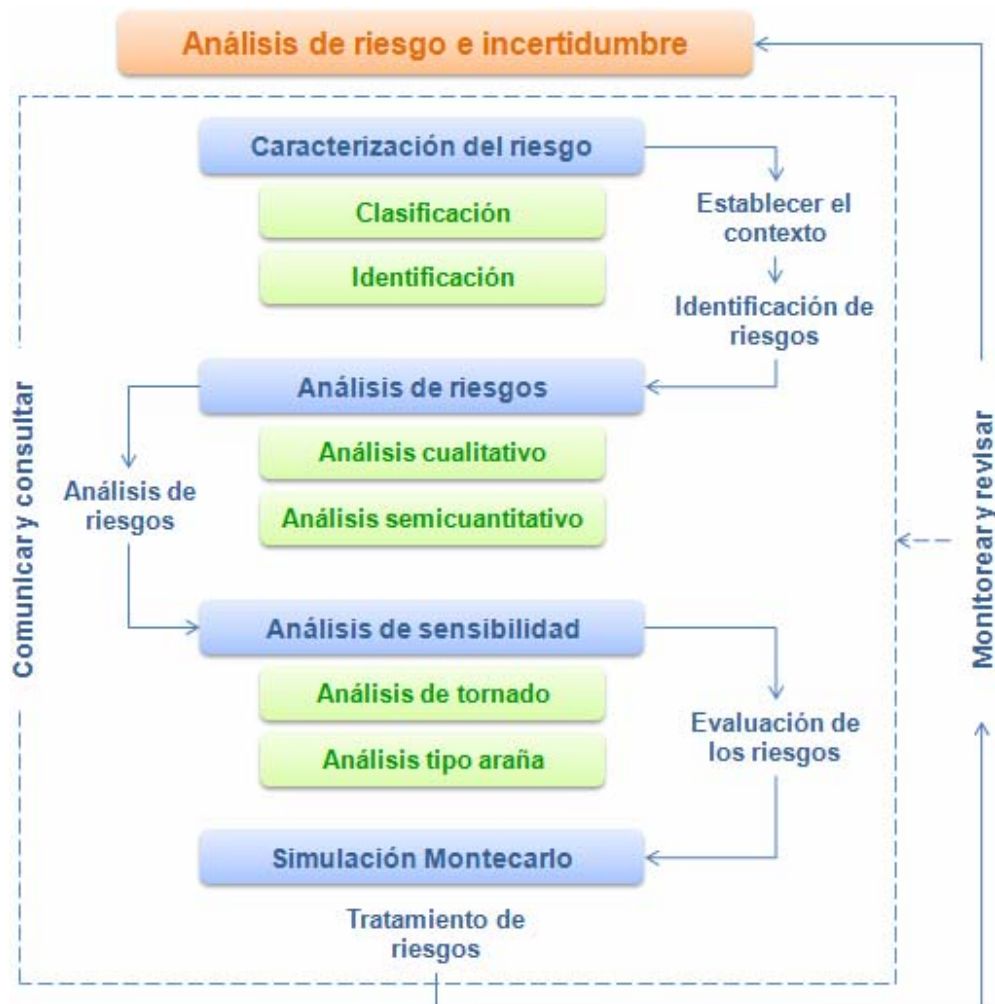
Figura 14: Metodología para la evaluación económica de un proyecto de inyección de vapor



Fuente: Los Autores.

Es importante entender las incertidumbres asociadas a la ejecución de un proyecto de inyección de vapor, ya que para su desarrollo se requiere gran cantidad de recursos. Identificar y medir las variables críticas que afectan el proyecto, facilitan la labor de dirección y control durante su ejecución. En la *Figura 15*, se esquematiza la metodología para analizar el riesgo e incertidumbre conforme al proceso de gestión integral de riesgos, que consiste en el manejo eficiente de planificación, organización, dirección y control dirigido a la reducción de riesgos y la recuperación ante eventos ya ocurridos.

Figura 15: Proceso de análisis del riesgo e incertidumbre.



Fuente: Los Autores.

3.1. CARACTERIZACIÓN DEL RIESGO

Como se describió en el capítulo anterior, en el proceso de definición de los riesgos, se implementó una metodología basada en la caracterización, que consiste en clasificar e identificar los riesgos que puedan existir en las diferentes fases del proyecto de inyección de vapor.

En la *Figura 16*, se ilustra la metodología que se implementó para identificar los tipos de riesgos; y que a su vez, se dividieron en tres categorías: *riesgos de entorno*, *riesgos financieros* y *riesgos por retraso en ejecución*, ya que para el caso de estudio, son los que mayor incidencia tienen en la evaluación económica del proyecto.

Figura 16: Proceso de caracterización del riesgo.



Fuente: Los Autores.

La forma de realizar la identificación del riesgo se basó en la elaboración de un inventario de riesgos. En esta etapa, se debe ingresar la información, presentando una descripción de cada uno de los riesgos, definir las posibles consecuencias y las acciones correctivas que se deben tomar para monitorear, controlar y disminuir su impacto sobre el proyecto. *Figura 17*.

Figura 17: Información recopilada para identificar el riesgo.

Información ingresada por el usuario en la identificación del riesgo

Riesgo	Consecuencias de este riesgo, estimando el valor de los posibles daños	Frecuencia con que ocurre	Acciones de mitigación
ENTORNO			
FINANZAS			
ATRASOS EN EJECUCIÓN			

Se clasifica en:

- Alto (A)
- Medio (M)
- Bajo (B)

Teniendo como referencia el ciclo de vida, fases o etapas del proyecto

Fuente: Los Autores.

Cabe recordar, que el proceso de identificación del riesgo debe ser permanente, con el fin de analizar aquellos eventos que podrían afectar el cumplimiento de los objetivos estratégicos del proyecto.

3.2. ANÁLISIS DE RIESGOS

El análisis del riesgo es un proceso que busca estimar la probabilidad de que ocurran sucesos no deseados, permitiendo medir la magnitud de dichos

impactos negativos en el transcurso de las etapas del proyecto. En la *Figura 18*, se muestra el proceso del análisis de los riesgos, el cual consiste no sólo en una observación detallada y sistemática, sino que permite el conocimiento de los riesgos y sus fuentes o causas, las consecuencias potenciales, y la probabilidad de que esto se presente.

Figura 18: Proceso del análisis de riesgos.



Fuente: Los Autores.

Este proceso no es otra cosa que la valoración cualitativa del riesgo de acuerdo con su impacto, probabilidad de ocurrencia y las posibles acciones para su mitigación. A continuación, se discutirán las primeras herramientas disponibles para el análisis de los riesgos: los análisis cualitativo y semicuantitativo.

3.2.1. Análisis cualitativo No todos los riesgos identificados son críticos, ni a todos se le debe prestar el mismo nivel de atención. Para asignar la mayor cantidad de recursos a los riesgos que más lo justifican, es necesario poder

evaluar y priorizarlos mediante el análisis cualitativo o matriz de riesgos, *Figura 19*. Para ello se recomienda seguir los siguientes pasos:

- Definir adecuadamente el evento o escenario a analizar.
- Estimar las consecuencias o impactos potenciales.
- Estimar la probabilidad de ocurrencia de las consecuencias.

El valorar los riesgos en forma cualitativa, no es una ciencia exacta. La evaluación de las consecuencias se basa en escenarios supuestos de “qué puede ocurrir”, y la estimación de la probabilidad en información histórica acerca de lo que ocurrió en tales escenarios, en similares condiciones, sabiendo que las circunstancias no son exactamente las mismas. Es común que para facilitar su identificación, se adicionen colores a la matriz de análisis cualitativo, y que se definan criterios sobre los niveles de tolerancia a aplicar. También es frecuente que aquellos riesgos considerados como altos y medios deban tener acciones de mitigación a fin de poder llevarlos a un horizonte aceptable (que puede ser de nivel bajo), dentro de criterios de evaluación económica.

Una manera de ilustrar la evaluación de algunos de los riesgos previamente identificados para un proyecto de inyección de vapor y su calificación, es mediante la utilización de una matriz de cuatro colores, los cuales reflejan el nivel de gravedad en el impacto y manejo de los riesgos. A partir del diagrama se puede apreciar claramente qué riesgos son los de mayor impacto sobre la buena ejecución del proyecto, y por consiguientes, sobre cuáles se hará una medición más exhaustiva.

Figura 19: Valoración cualitativa del riesgo.

- Riesgos de entorno
- Riesgos financieros
- Riesgos por atrasos en ejecución

Riesgo = Probabilidad x Impacto

TIPO DE RIESGO	Consecuencias y/o Impacto	Probabilidad de ocurrencia	P x I
R.1			
R.2			
R.3			
...			
R.n			

Ubicación de riesgos identificados

Fuente: Los Autores.

3.2.2. Análisis semicuantitativo Debido a los problemas asociados con la subjetividad y la falta de exactitud al momento de calificar los riesgos utilizando el método cualitativo, es útil asignar valores numéricos a las escalas de la matriz, en lo que se conoce como análisis semicuantitativo, *Figura 20*. Lo que se busca con esto es facilitar y precisar más en la calificación de los riesgos, sin que se requiera aún de magnitudes exactas, las cuales van a ser posibles de obtener en la medida que se adelante un análisis cuantitativo.

Figura 20: Esquema del análisis semicuantitativo.

CONSECUENCIAS Y/O IMPACTO		PROBABILIDAD DE OCURRENCIA							
		REMOTO A 0,5	IMPROBABLE B 1	POSIBLE C 2	PROBABLE D 5	FRECUENTE E 10			
ENTORNO	FINANZAS	RETRASO EN EJECUCIÓN							
	> 10000 KUS\$	> 1 semana	Critico	5	100				
	5000-10000 KUS\$	3 días - 1 semana	Alto	4	50				
	1000-5000 KUS\$	1 día - 3 días	Moderado	3	15				
	100-1000 KUS\$	12 horas - 1 día	Menor	2	5				
	< 100 KUS\$	< 12 horas	Bajo	1	1				

Convención	
Insignificante	
Bajo	
Medio	
Alto	

En la figura anterior se muestra, que para cada grupo de riesgos identificados, las consecuencias y/o impacto, presentan una valoración particular, que facilita asociar y evaluar el nivel de complejidad del riesgo.

Como se detallan en las *Figuras 21, 22 y 23*, para los riesgos de entorno, la escala está representada por el grado de daño; en los riesgos por retrasos en ejecución, las consecuencias se dan en valores de tiempo, mientras que para los riesgos financieros se muestra una escala en función del dinero.

Figura 21: Valoración para los riesgos de entorno.

RIESGOS DE ENTORNO	VALORACIÓN	
Daño severo y prolongado	Crítico	100
Daño severo de corto plazo	Alto	50
Daño localizado	Moderado	15
Daño menor	Menor	5
Daño leve	Bajo	1

Fuente: Los Autores.

Figura 22: Valoración para los riesgos financieros.

RIESGOS FINANCIEROS	VALORACIÓN	
> 10000 KUS\$	Crítico	100
5000-10000 KUS\$	Alto	50
1000-5000 KUS\$	Moderado	15
100-1000 KUS\$	Menor	5
< 100 KUS\$	Bajo	1

Fuente: Los Autores.

Figura 23: Valoración para los riesgos por retrasos en ejecución.

RIESGOS POR RETRASOS EN EJECUCIÓN	VALORACIÓN	
> 1 semana	Crítico	100
3 días - 1 semana	Alto	50
1 día - 3 días	Moderado	15
12 horas - 1 día	Menor	5
< 12 horas	Bajo	1

Fuente: Los Autores.

Es importante llevar todos los impactos de los riesgos a términos económicos, gracias a lo cual es posible no solamente sumar indistintamente todo ellos, sino que se agiliza la comunicación con la alta administración y se facilita la toma de decisiones en cuanto al establecimiento de acciones de control efectivas.

3.3. ANALISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad ofrece el primer acercamiento a la medición de riesgos, y gracias a ello, permite confirmar la priorización de riesgos realizada con el análisis cualitativo. El proceso se observa en la *Figura 24*. Su relevancia radica en que se trata de una herramienta simple de construir e interpretar, y ofrece un buen punto de partida para análisis más complejos como el análisis de escenarios y la simulación Montecarlo, entre otros.

Existen esquemas diferentes de los análisis de sensibilidad, que son empleados de acuerdo con el nivel de complejidad deseado, entre ellos se encuentran el *análisis tipo araña* y el *análisis de tornado*. Con estos se busca

visualizar el comportamiento de una variable resultado, tal como el VPN, a una variable cambiante, que pudiera ser el precio del petróleo.

Cuando se desea revisar la importancia relativa de las variables dentro de los análisis de sensibilidad de tornado y araña, se recomienda modificarlas en una proporción igual al 10 o 20% del valor que tiene en el caso base. De esta forma se evita que aquella que presente mayor incertidumbre (y con ello genere mayor fluctuación), pueda considerarse como más sensible, a pesar de que sea la más crítica en el resultado. Para ello, es necesario que cada riesgo que se desea analizar se encuentre especificado como una variable independiente.⁹

Figura 24: Proceso del análisis de sensibilidad.



Fuente: Los Autores.

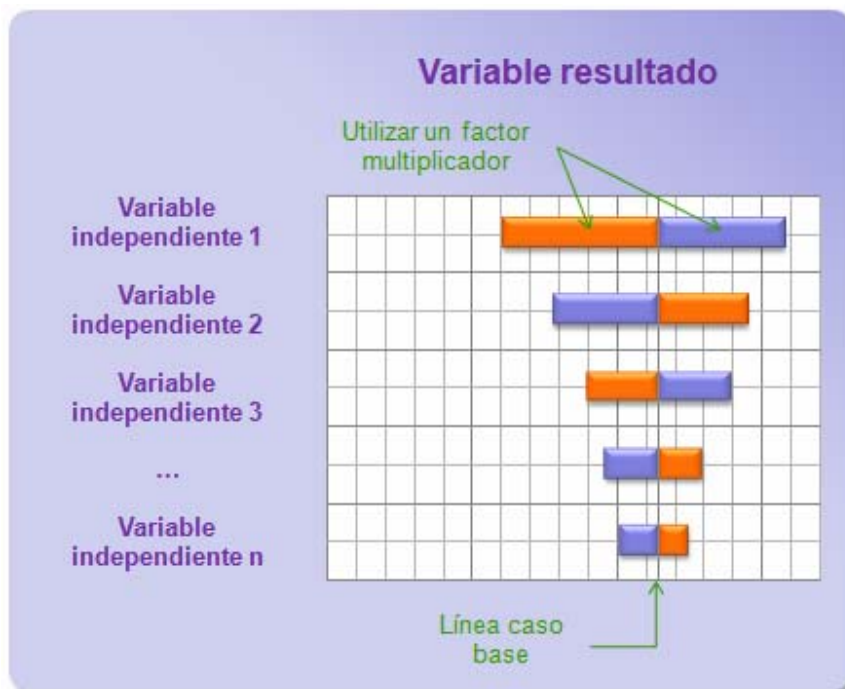
3.3.1. Análisis tornado El análisis tornado presenta la información de una manera más completa para el analista y para quien toma la decisión. Como se observa en la *Figura 25*, la gráfica debe su nombre a que se organizan las variables de acuerdo con su nivel de relevancia en el resultado final y se presentan las variaciones en términos absolutos, lo cual permite visualizar de

⁹ SANCHEZ M, BRAVO O, Op. Cit., p. 227.

una forma más clara la repercusión que tiene cada variable sobre el VPN del proyecto.

La línea vertical representa el caso base. En algunas ocasiones es posible apreciar visualmente el punto de equilibrio de acuerdo con el desempeño de cada una de las variables analizadas, lo cual se logra trazando una línea imaginaria cuando la utilidad se hace igual a cero.

Figura 25: Esquema del análisis tornado.



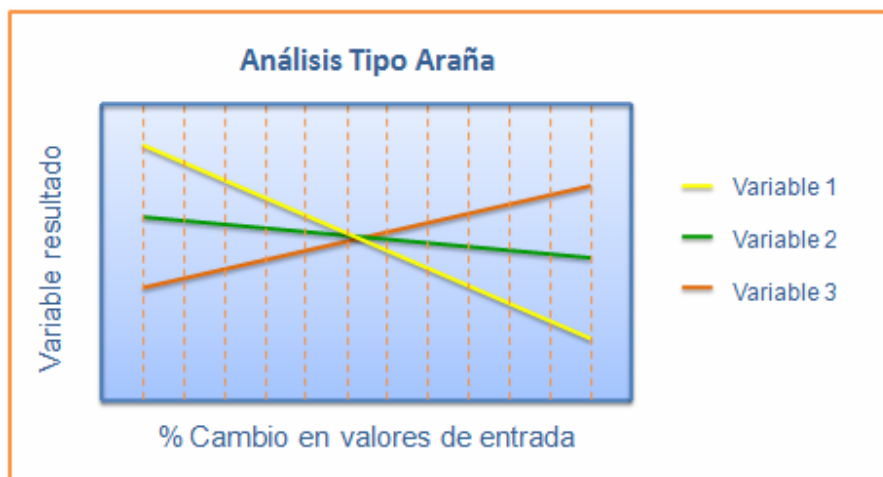
Fuente: Los Autores.

Las barras de color más oscuro, que se encuentran a la derecha de la línea vertical que representa el caso base en el análisis tornado, indican que se comportan en forma directamente proporcional a la variable dependiente. En el caso de una variable que sea inversamente proporcional al resultado esta irá a la parte izquierda.

3.3.2. Análisis tipo araña

El análisis tipo araña permite establecer el impacto porcentual de la variación de las incertidumbres presentes en el proyecto. Estos diagramas, *Figura 26*, representan los mismos valores y rangos de valores que los diagramas de tornado, pero su representación gráfica varía ya que aquí se representan cambios porcentuales respecto a valores fijos de referencia. Es decir, que para cada uno de los parámetros, variamos su valor en un determinado rango de porcentajes respecto a su valor original y observamos la utilidad esperada. De esta manera, obtenemos una serie de puntos que en conjunto se asemejan a un segmento de recta que nos indica la variación de la utilidad respecto a la variación porcentual del valor de referencia, es decir, cuanto más inclinada respecto a la horizontal esté una línea de un parámetro, más significativo es el cambio del valor de la utilidad. Por tanto, la pendiente de la línea es un indicador de lo significativo que es un parámetro para el cálculo de la utilidad.

Figura 26: Diagrama del análisis tipo araña.



Fuente: Los Autores.

Los análisis de sensibilidad tipo tornado y araña son complementarios. Tradicionalmente, el primero de ellos es más empleado, debido a que es más fácil de leer e interpretar. Sin embargo, el segundo se utiliza para revisar el comportamiento lineal de las variables dependientes.

Como se puede ver, la gran ventaja del análisis de sensibilidad es que permite identificar las variables críticas, para poder enfocar los esfuerzos y las acciones de mitigación de riesgos que se definan, siendo estos los factores de éxito del proyecto u oportunidad de negocio.

Sin embargo, no debe perderse de vista que el análisis tiene la gran limitación de no permitir ver el efecto de la interrelación de las variables entre sí, o la posibilidad de modificarlas de forma simultánea, lo cual es de gran utilidad para medir su importancia relativa real en el valor del proyecto.

3.4. SIMULACIÓN MONTECARLO

Al realizar un análisis de sensibilidad para evaluar una situación incierta, el horizonte de evaluación se circunscribe al planteamiento de escenarios, buscando hacerse una idea de lo que pueda ocurrir en el futuro. Sin embargo, esos escenarios por bien que puedan estar, son limitados, ya que en la realidad puede ocurrir cualquier cosa, y lo ideal es estar preparados para evaluar cualquier tipo de situación posible.

El propósito de la simulación es imitar el mundo real a partir de la utilización de un modelo matemático que permita estudiar las propiedades y características de la situación analizada, para generar conclusiones y tomar decisiones basados en los resultados.

Las etapas necesarias para realizar el proceso son:

- Construcción del modelo matemático.
- Identificación de las variables críticas.
- Definición de las distribuciones de probabilidad de las variables aleatorias.
- Construcción del modelo de simulación.
- Realización de la simulación.
- Análisis de resultados.
- Generación de análisis complementarios.

Es de esperar que las variables que arrojan alto impacto en el análisis de sensibilidad, y que se presentan en el diagrama de influencia, sean aquellas a las que se les definen distribuciones de probabilidad para utilizar en el modelo de simulación.

La Simulación Montecarlo es una técnica que convierte la incertidumbre en variables de entrada a un modelo dentro de distribuciones de probabilidad. Mediante la combinación de las distribuciones y la selección de valores aleatorios recalcula el modelo simulado muchas veces y proporciona la probabilidad de los valores de salida.

La clave de la simulación Montecarlo consiste en crear un modelo matemático del sistema, proceso o actividad que se quiere analizar, identificando aquellas variables (*inputs* del modelo) cuyo comportamiento aleatorio determina el comportamiento global del sistema. Una vez identificados dichos *inputs* o variables aleatorias, se lleva a cabo un experimento consistente en (1) *generar* - con ayuda del computador - *muestras aleatorias* (valores concretos) para dichos *inputs*, y (2) analizar el comportamiento del sistema ante los valores generados. Tras repetir n veces

este experimento, se dispondrá de n observaciones sobre el comportamiento del sistema, lo cual será de utilidad para entender el funcionamiento del mismo –obviamente, el análisis será tanto más preciso cuanto mayor sea el número n de experimentos que llevemos a cabo.

3.4.1. Características básicas

- La simulación Montecarlo permite que varios inputs sean utilizados al mismo tiempo para crear la distribución de probabilidades de uno o varios outputs (o valores de salida).
- Diferentes tipos de distribuciones de probabilidad pueden ser asignadas a los inputs del modelo. Cuando la distribución no se conoce, el número 1, que representa el mejor ajuste, podría ser elegido.
- La utilización de los números aleatorios caracterizan a la simulación Montecarlo como un método estocástico. Los números aleatorios tienen que ser independientes, no debería existir correlación entre ellos (*característica de una variable aleatoria*).
- La simulación Montecarlo genera los resultados como un rango en lugar de un valor fijo y muestra cuál es la probabilidad de que el resultado final se dé dentro de ese rango.

3.4.2. Algoritmo para implementar una Simulación Montecarlo

El algoritmo de Simulación Montecarlo está fundamentado en la generación de números aleatorios basado en las distribuciones acumuladas de frecuencias. Los pasos para implementar una simulación son los siguientes:

- Determinar las variables aleatorias y sus distribuciones acumuladas.
- Generar un número aleatorio uniforme $\in (0,1)$.
- Determinar el valor de la variable aleatoria para el número aleatorio generado de acuerdo a las clases que tengamos.
- Calcular media, desviación estándar error y realizar el histograma.
- Analizar resultados para distintos tamaños de muestra.

En los pasos dos y tres se debe iterar tantas veces como sea necesario.

Otra opción para trabajar con Montecarlo, cuando la variable aleatoria no es directamente el resultado de la simulación o existen relaciones entre variables es la siguiente:

- Diseñar el modelo lógico de decisión.
- Especificar distribuciones de probabilidad para las variables aleatorias relevantes.
- Incluir posibles dependencias entre variables.
- Muestrear valores de las variables aleatorias.
- Calcular el resultado del modelo según los valores del muestreo (iteración) y registrar el resultado.

- Repetir el proceso hasta tener una muestra estadísticamente representativa.
- Obtener la distribución de frecuencias del resultado de las iteraciones.
- Calcular media, desvío.
- Analizar los resultados.

3.4.3. Matemática detrás de la Simulación Montecarlo Si se considera una función real valuada $g(x)$ con una función de frecuencia de probabilidad $P(x)$ (si x es discreta) o función de densidad $f(x)$ (si x es continua). Se puede definir entonces el valor esperado de $g(x)$ en términos discretos y continuos respectivamente:

$$E(g(x)) = \sum_{-\alpha}^{+\alpha} g(x)P(x), \text{ donde } P(x) > 0 \text{ y } \sum_{-\alpha}^{+\alpha} P(x) = 1 \quad (2)$$

$$E(g(x)) = \int_{-\alpha}^{+\alpha} g(x)f(x)dx, \text{ donde } f(x) > 0 \text{ y } \int_{-\alpha}^{+\alpha} f(x)dx = 1 \quad (3)$$

Luego, al hacer n pruebas aleatorias de $X (X_1, \dots, X_n)$, también llamado correr una prueba o hacer correr una simulación, calcular $g(x_1) \dots g(X_n)$ y encontrar la media de $g(x)$ de la muestra:

$$\mu g(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(x_i) \quad (4)$$

La cual representa el valor final simulado de $E(g(X))$

Por tanto, $\mu g(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(x_i)$ será el estimador de Montecarlo de $E(g(x))$.

Como $n \rightarrow \infty, \mu g(x) \rightarrow E(g(X))$, se está en condiciones de computar la dispersión en torno a la media estimada con la varianza imparcial de $\mu g(x)$

$$\text{Var}(\mu g(X)) \rightarrow \frac{1}{n} \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (g(x_i) - \mu g(x))^2 \quad (5)$$

3.4.4. Funciones de distribución e histograma En muchas circunstancias se tienen un número de datos correspondientes a las posibilidades de ocurrencia de un evento, o diferentes resultados asociados que reflejan lo que puede suceder en determinada situación que se está analizando. Una forma típica de ilustrar esta información puede ser mediante una tabla. Sin embargo, este tipo de representación no siempre es eficiente, especialmente cuando existe gran cantidad de datos.

Es así como para representar las diferentes posibilidades de un evento, e ilustrar los conceptos de riesgo, oportunidad e incertidumbre nos podemos valer de gráficas del comportamiento de la variable aleatoria, que se conoce como *funciones de distribución*, las cuales son representaciones matemáticas que relacionan las posibilidades de un evento con su probabilidad de ocurrencia. Pueden ser continuas, si poseen infinito número de valores, o discretas, si presentan finito número de ocurrencias en un rango.

Uno de los problemas más grandes asociados a las funciones de distribución radica en que es difícil estar seguro de cuál de todas ellas se debe utilizar para representar una situación específica. Con el propósito de facilitar la comprensión de las funciones de distribución, a continuación se presenta un esquema general que las agrupa de acuerdo con sus características principales, buscando con ello que sea más sencillo comprender sus

particularidades, pero más importante aún, la forma en que se pueden utilizar en el modelaje de riesgos.

Para empezar se pueden agrupar así:

- *Las más comunes:* normal, lognormal, triangular, uniforme, distribución t.
- *Siguen procesos binomiales:* binomial, binomial negativa, geométrica, Bernoulli y Beta.
- *De los sucesos raros:* Poisson, gamma y exponencial.
- *En espera de que ocurra un suceso:* exponencial y Weibull.
- *Siguen un proceso hipergeométrico:* hipergeométrica, hipergeométrica inversa.
- *De valor extremo:* Gumbel, Weibull, pareto y Frechet.
- *Otras:* customizada, logística.

Es una práctica común expresar o resumir la distribución acumulada mediante la definición de tres únicos valores: P10, P50 y P90, los cuales corresponden a los percentiles acumulados. En algunas ocasiones, se expresa el riesgo como la ocurrencia de un percentil específico. Por ejemplo, para la duración o los costos esperados de una actividad, es práctica común de algunas empresas el utilizar el percentil 80 o P80 como el valor esperado para la toma de decisiones, el cual si bien es conservador o pesimista, refleja de una forma muy resumida las posibilidades de ocurrencia.

Es tradicional que las incertidumbres relacionadas con costos y gastos se expresan como distribuciones triangulares debido a la tendencia de las personas de presentar un escenario presupuestado, uno optimista y uno pesimista, de acuerdo con su experiencia. Si este es el caso, se debe tener cuidado de definir las distribuciones triangulares a partir de los percentiles P10 y P90, y no como los extremos de la distribución, los cuales no se presentan casi nunca.

3.4.4.1. Pruebas de bondad y ajuste Existe un sinnúmero de funciones de distribución teóricas, las cuales poseen ecuaciones que describen de una manera precisa el comportamiento de una variable, y así, poder realizar muestreos basados en la forma de la distribución que mejor represente la incertidumbre a analizar. Existen dos métodos que se utilizan para seleccionar la función más representativa, y se utilizan dependiendo de si se tienen datos históricos o tan solo se conoce el comportamiento general y la variabilidad.

En el primer caso, que es el más ideal pero desafortunadamente no es el más común, se proceden a realizar pruebas estadísticas que permitan determinar la función de distribución que mejor se ajuste a los datos disponibles. Para ello se puede hacer uso de Crystal Ball[®].

Las tres pruebas no paramétricas utilizadas por el programa Crystal Ball[®] son: chi-cuadrado, Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling. Estas pruebas tradicionalmente comparan los datos disponibles con una distribución de probabilidad estándar mediante el cálculo del factor de ajuste representado por el valor denominado p.

La primera de ellas es la más conocida, sin embargo requiere para su utilización de muestras de cómo mínimo 30 datos, aunque algunos autores sugieren 50. Típicamente, la forma de realizar la prueba es calculando en primer lugar la sumatoria de la diferencia entre valores existentes menos los teóricos (correspondientes a cada distribución teórica probada) y posteriormente elevados al cuadrado, en forma similar a como se estima la desviación estándar. Posteriormente se divide el resultado por los valores esperados, de acuerdo con los grados de libertad, y el resultado se lleva a la distribución chi-cuadrado. Si el valor calculado es inferior al teórico, se considera que el ajuste es bueno, y se acepta la prueba.

Sin embargo, a efectos de agilizar el proceso, Crystal Ball[®] realiza la prueba de ajuste con las distribuciones teóricas que tiene predefinidas de forma un poco diferente. Para ello divide la distribución en áreas de igual probabilidad y compara los resultados reales con los esperados de la distribución teórica, y de esa manera se evita el cálculo del valor p. En forma análoga, para la prueba Kolmogorov-Smirnov se calcula la distancia vertical más grande pero entre las dos distribuciones acumuladas. Por su parte, para la prueba de Anderson-Darling se utiliza el mismo método, excepto que compara las distribuciones acumuladas en los valores extremos.

En muchas ocasiones no se cuenta con suficiente número de datos que permitan construir las distribuciones de frecuencia de la variable aleatoria de interés. Para poder expresar su comportamiento, es necesario conocer el uso y características de las funciones de distribución de probabilidad más comunes, y de esa forma definir la que mejor se adapte al fenómeno que se desea representar.

3.4.4.2. Histogramas de frecuencia Se utilizan para expresar los resultados de la interacción de diferentes funciones de distribución, como en

el caso de los cálculos de la rentabilidad de un proyecto, o en su tiempo estimado de finalización. Para esto se generan números de forma aleatoria de acuerdo con la forma de las distribuciones de frecuencia previamente definidas, las cuales reflejan el rango de valores en que podría caer la variable de interés, sin que se conozca con exactitud el valor final que pueda llegar a tener. Lo que se busca es contar con suficiente número de iteraciones para que el error de la muestra sea lo más pequeño posible, y los resultados se aproximen de la mejor manera posible a la población.

Un aspecto importante a considerar al momento de realizar un muestreo tiene que ver con el número de iteraciones y el error estándar de la media para revisar la validez de los resultados, de manera que las conclusiones a las que se llegue basados en la muestra sean fiel reflejo del desempeño de la población.

En vista de que no es posible obtener con total exactitud el valor de la media de la población de un muestreo, se debe establecer un límite de confianza, el cual refleja el intervalo en el que se encuentra el parámetro de interés de la población que se requiere estimar. La forma de hacerlo es, en primer lugar estableciendo el rango de confianza deseado, y, posteriormente calculándolo a partir de la distribución normal o de la distribución t.

Los histogramas son útiles para expresar los múltiples resultados de un análisis, como el de la rentabilidad de un proyecto, gracias a que permiten presentar de forma gráfica el sinnúmero de valores posibles de VPN junto con sus probabilidades de ocurrencia. De esta manera, quien toma la decisión puede visualizar los diferentes cursos de acción y los resultados esperados, lo cual es mucho mejor que una única estimación o valor más probable, el cual en la realidad nunca ocurre, ya que suele ser un promedio o la combinación de los diferentes escenarios esperados.

3.4.5. Análisis de correlación En algunas ocasiones es necesario medir el grado de similitud en el comportamiento de dos variables en un proceso objeto de análisis, o de los flujos de caja de dos proyectos, con el propósito ya sea de diversificar las inversiones de una compañía, o de poder representar adecuadamente sus interrelaciones.

Para ello es útil contar con la covarianza, una medida estadística que refleja el grado de movimiento conjunto de dos variables, la cual para una muestra se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Cov_{r_a r_b} = \frac{\sum_{i=1}^n [r_{a_i} - \bar{r}_a][r_{b_i} - \bar{r}_b]}{n-1} \quad (6)$$

Donde:

$Cov_{r_a r_b}$ = Covarianza entre los valores de las variables a y b.

r_{a_i} = Valor de la variable aleatoria a.

\bar{r}_a = Promedio de la variable r_a .

r_{b_i} = Valor de la variable aleatoria b.

\bar{r}_b = Promedio de la variable r_b .

n = Tamaño de las muestra.

Es necesario normalizar el valor de la covarianza mediante el coeficiente de correlación. Con la covarianza ocurre algo similar como con la desviación estándar, y tiene que ver con la difícil comprensión intuitiva de la cifra obtenida, excepto por el hecho de que sea positiva o negativa. Por esa

razón, al usar el coeficiente de correlación es posible poner límites a la covarianza al dividirla por la desviación estándar de las dos series de datos:

$$\rho_{r_a r_b} = \frac{Cov_{r_a r_b}}{\sigma_{r_a} \sigma_{r_b}} \quad (7)$$

Donde:

$\rho_{r_a r_b}$ = Coeficiente de correlación.

$Cov_{r_a r_b}$ = Covarianza.

σ_{r_a} = Desviación estándar de la variable aleatoria a.

σ_{r_b} = Desviación estándar de la variable aleatoria b.

El coeficiente de correlación (ρ), varía entre -1 y +1, para el caso de correlación perfecta, ya sea positiva o negativa, y si se conocen los valores de una serie de datos, entonces se puede predecir la otra.

En forma alterna, Excel[®] posee la función Coef.de.correl en la parte estadística, *Figura 27*, la cual permite determinar los coeficientes de correlación basados en series de datos, esto se logra al mostrar en el modelo matemático (flujo de caja), los sobrecostos generados por los riegos presentes en el proyecto y combinarlos en forma de matriz, como se observa en la *Figura 28 y 29*.

Figura 27: Función para el cálculo del coeficiente de correlación.

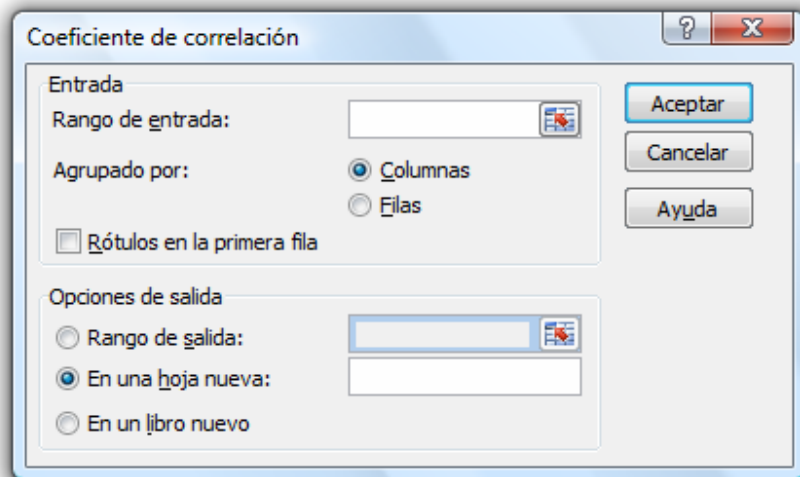


Figura 28: Reporte de sobrecostos generados en el tiempo por los riesgos.

	Sobrecostos		
Período	Riesgo 1	Riesgo 2	Riesgo 3
1			
2			
...			
n			

Figura 29: Reporte de los coeficientes de correlación.

	Sobrecostos		
	Riesgo 1	Riesgo 2	Riesgo 3
Riesgo 1	1		
Riesgo 2	x	1	
Riesgo 3	x	x	1

Es posible incluir múltiples correlaciones entre variables en una forma más práctica mediante la utilización de la herramienta denominada Correlation

Matrix (matriz de correlaciones) que se encuentra en programa Crystal Ball®. De esta forma es posible incluir en forma organizada y rápida los coeficientes de correlaciones que afectan un grupo de variables aleatorias. El método de calcular el coeficiente de correlación entre Excel® (Pearson) y Crystal Ball® (Spearman) es diferente debido a que el primero asume un comportamiento lineal entre las variables, y que las residuales están distribuidos en forma normal, algo que no necesariamente es cierto cuando se compara información entre funciones de distribución, los cuales incluso pueden llegar a estar truncadas o acotadas.

Se ha encontrado que el error más común cuando se construye un modelo que permite generar una simulación de Montecarlo, es por omisión de las correlaciones entre las variables, lo cual puede implicar diferencias en el resultado final de hasta un 50 por ciento. De aquí que sea tan importante considerarlas, y en caso de duda sobre su necesidad de utilización, tan solo realice el cálculo con la ayuda de Excel®, y para valores superiores a 0,3 o inferiores a -0,3, no olvide incluirlas en el modelo.

3.4.6. Generación de números aleatorios El computador está en capacidad de generar escenarios y números aleatorios a partir de una serie de reglas que se le asignen, y de esa forma poder evaluar diferentes condiciones futuras. Sin embargo, realizar este procedimiento requiere el conocimiento de las reglas sobre la forma en que se comportan dichas variables, y exige la comprensión de los procesos que se están realizando, so pena de no comprender los resultados obtenidos.

La manera más simple de generar una simulación de resultados financieros utilizando las herramientas de Excel® es a partir de la opción de generación de número aleatorios. Para esto, vaya al menú Datos, señale la opción

Análisis de datos, *Figura 30*, y en el recuadro que aparece, seleccione Generación de números aleatorios. Ver *Figura 31*.

Figura 30: Análisis de datos en Excel®.

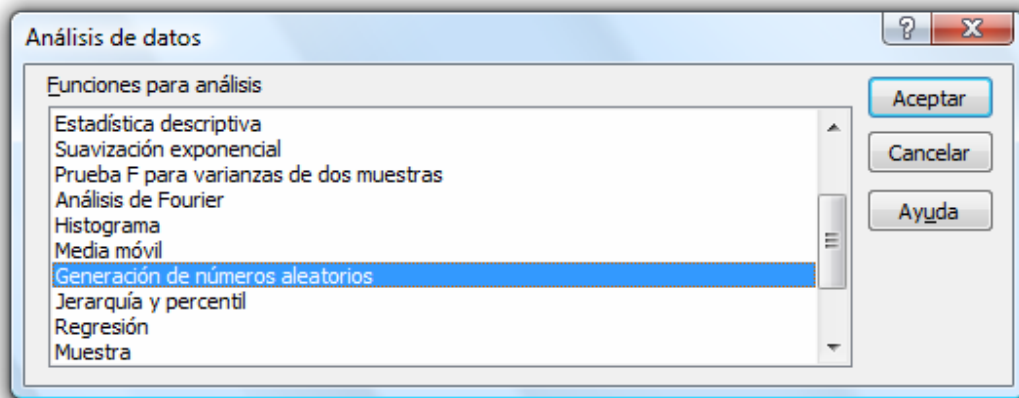
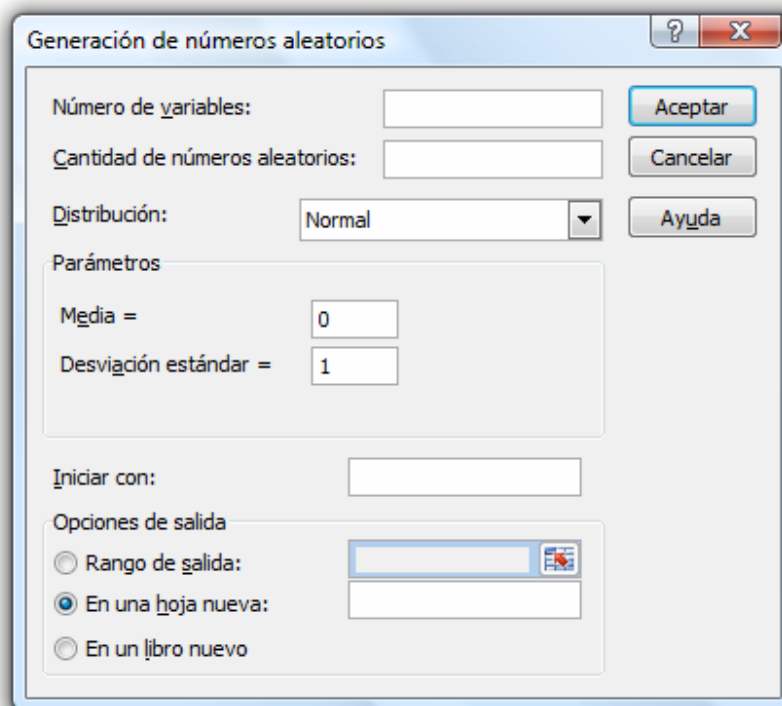


Figura 31: Generación de números aleatorios en Excel®.



Uno de los inconvenientes cuando se presentan análisis relacionados con simulaciones de Montecarlo, ocurre cuando se reportan los resultados del ejercicio, ya que estos son diferentes cada vez que la simulación se repite. Eso implica que si se imprimen y se presentan para discusión, y por alguna razón es necesario volver a realizar el ejercicio, nunca se logrará obtener exactamente el mismo resultado que previamente se consideró. No sobra recomendar la práctica de generar un reporte del ejercicio en el que se establezcan claramente el día y la hora en que se realizó la simulación, a fin de evitar problemas y confusiones.

3.4.7. Intervalos de confianza Para trabajar el concepto de simulación en forma apropiada, es importante repasar algunos conceptos estadísticos. El generar iteraciones para entender una situación en particular, y a partir de los resultados tomar decisiones, constituye una herramienta muy poderosa. Sin embargo, se deben conocer las características y limitaciones sobre las cuales se basa antes de empezar su uso extensivo. Los modelos de simulación se fundamentan en dos principios básicos de las estadísticas:

- La ley de los grandes números.
- EL teorema del límite central.

De acuerdo con la ley de los grandes números, cuando se genera en la forma aleatoria una cantidad suficiente de repeticiones que sean representativas de la población analizada, el valor promedio o media de la muestra y la forma de la distribución resultante serán muy similares a la de la población. Esto a la larga garantiza que los resultados que se generen con la simulación reflejen la realidad de la situación que se desea analizar. Entre más grande sea el número de la muestra, mejor será la información que se obtenga, y podrá inferirse el comportamiento de la población con mayor

exactitud. Sin embargo, ¿cuántas iteraciones o muestras son necesarias para obtener información relevante para tomar decisiones? Para responder a este interrogante, es necesario apelar al segundo de los principios básicos: el teorema de límite central. En términos generales el teorema establece que independientemente de la forma y característica de la población analizada, el valor medio de la muestra que se obtenga será representativo del promedio de la población, y la forma de la distribución resultante será normal, lo cual permite establecer límites de confianza. En términos matemáticos, esto quiere decir que:

$$\bar{\chi} \cong \mu \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

Donde:

$\bar{\chi}$ = Promedio de la muestra.

μ = Promedio de la población.

σ = Desviación estándar de la población.

s = Desviación estándar de la muestra o error estándar de la muestra.

n = Número de muestras.

Esto implica que en la medida que aumenta el número de muestras de la población, la desviación estándar de la muestra es menor, y el grado de exactitud en el valor medio de la misma se incrementará. La cantidad de ensayos requeridos para alcanzar cierto nivel de exactitud, el cual es definido por quien toma la decisión, se puede establecer a partir de los niveles de confianza referentes de la distribución normal, y el valor tolerable en el

resultado del valor medio obtenido, los cuales se derivan de las siguientes ecuaciones:

$$LSC = \mu + Z\sigma \quad (10)$$

$$LIC = \mu - Z\sigma \quad (11)$$

Donde:

LSC = Límite superior de control.

LIC = Límite inferior de control.

Z = Variable aleatoria estándar.

Un mayor valor de Z implica que se desea incrementar el rango de confianza sobre los datos de la población. Es una práctica común el definir un intervalo de confianza del 95%, el cual implica un valor de Z de 1,96. En otras palabras, el valor medio que se obtenga como resultado del muestreo tiene un 95% de probabilidad de encontrarse en el intervalo definido por LSC y LIC. Con un mayor número de muestras de la población el tamaño del intervalo se reduce, debido a que se disminuye el valor de la desviación estándar de la muestra, con lo que se incrementa la calidad del estimativo.

Una vez definidos los límites de confianza es posible determinar la cantidad de ensayos necesarios para que la precisión en el valor medio de la muestra sea la deseada. El número mínimo de iteraciones requerido para determinado límite de confianza, y error esperado es igual a:

$$n_{\min} = \left[\frac{Z^* \sigma}{e} \right] \quad (12)$$

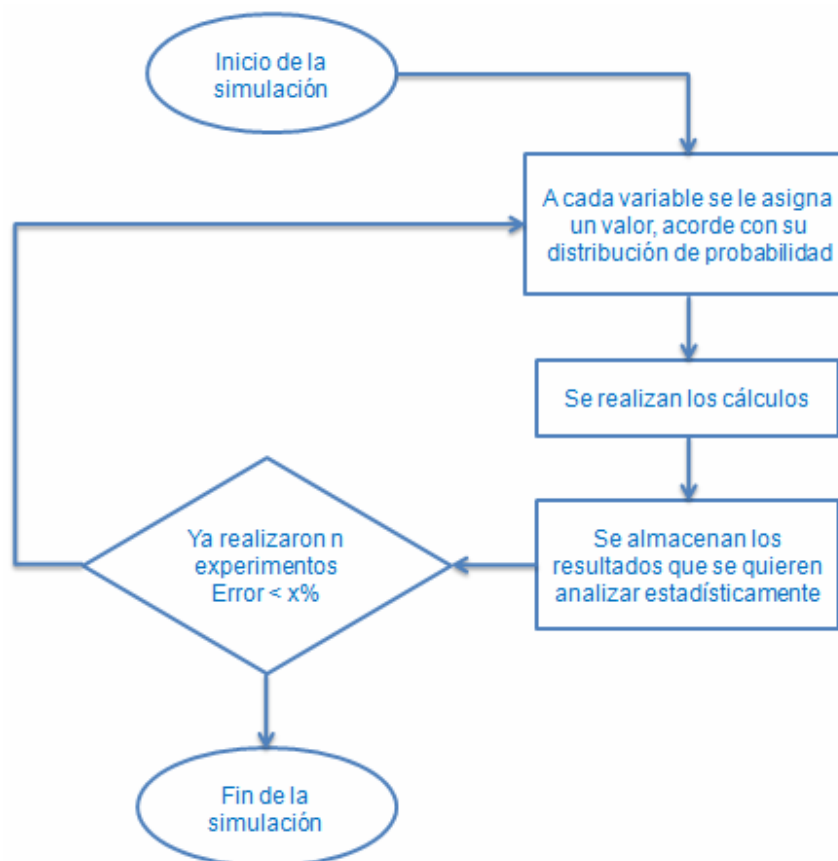
Donde:

n_{\min} = Cantidad de ensayos requeridos para alcanzar el nivel de confianza para la media de la muestra.

e = error aceptado para la media de la muestra.

Al realizar una simulación de Montecarlo es posible observar que la medida converge hacia un valor más ajustado en la medida que aumenta el número de iteraciones. Lo importante es que se realice un número suficiente de iteraciones para que los resultados sobre los que se realizan los análisis y se tomen las decisiones, sean verdaderamente significativos. A continuación, en la *Figura 32*, se describe este procedimiento.

Figura 32: Flujograma del proceso de simulación Montecarlo.



Fuente: Modificado. Gestión Integral de Riesgos. Bravo Oscar. 2007

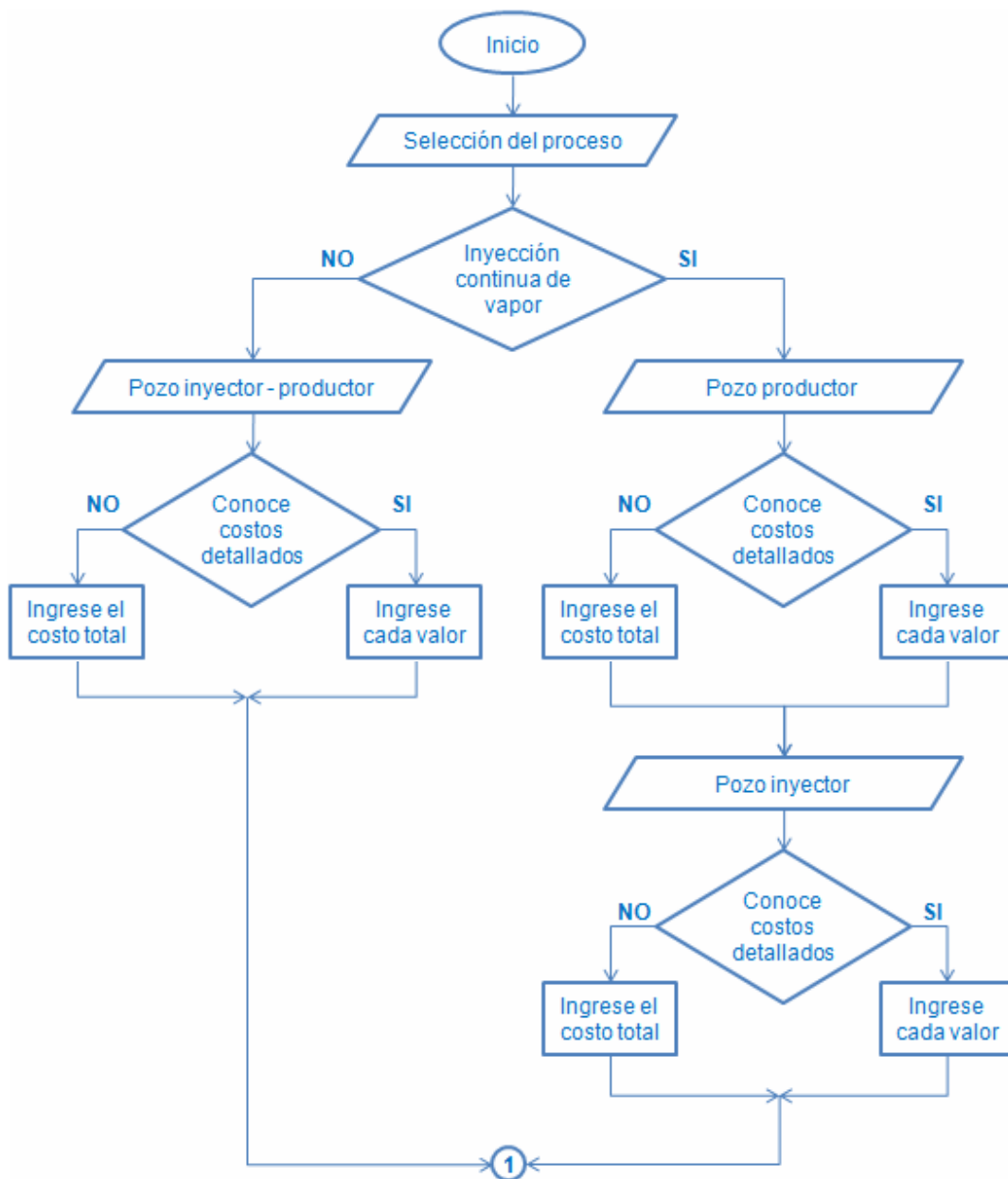
Cuando se realiza una simulación de Montecarlo, además de obtener el valor promedio de la población, también es posible determinar la forma de la distribución resultante, sus percentiles y demás características que serán de gran utilidad para entender las particularidades propias de la población.

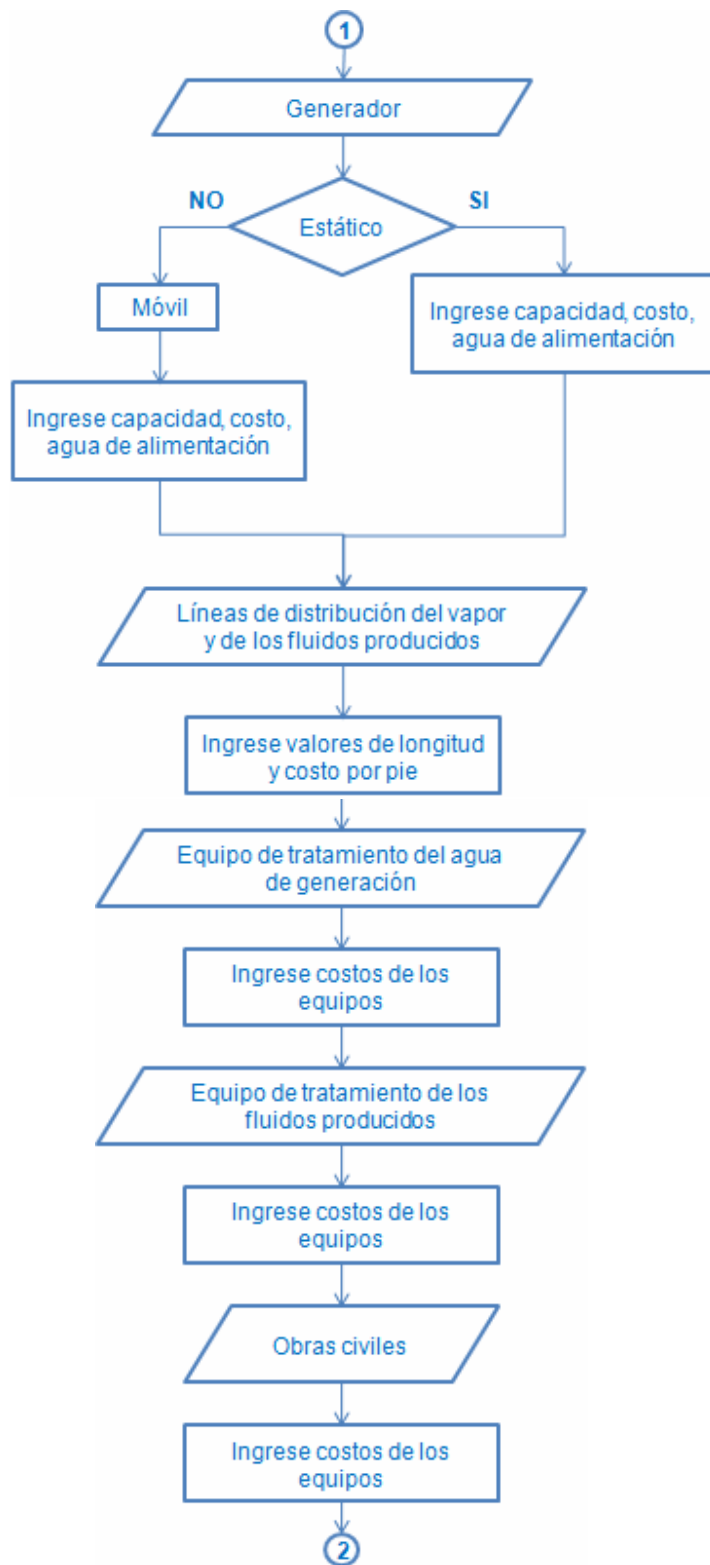
3.4.8. Construcción del modelo de simulación La simulación de Montecarlo es una técnica que permite considerar todas las posibles combinaciones, interrelaciones y escenarios que pueda tener un proyecto o situación específica que se requiera analizar. Al incluir la distribución de probabilidad de cada una de las variables críticas, es posible obtener la distribución total de los riesgos combinados, que no es otra cosa que la medición de la incertidumbre en la situación. Como resultado, es posible, por ejemplo, obtener las probabilidades de cumplimiento de una meta o de perder dinero (VPN negativo), lo cual es muy útil y en muchos casos es más fácilmente entendible para las personas que van a tomar decisiones con respecto a la situación.

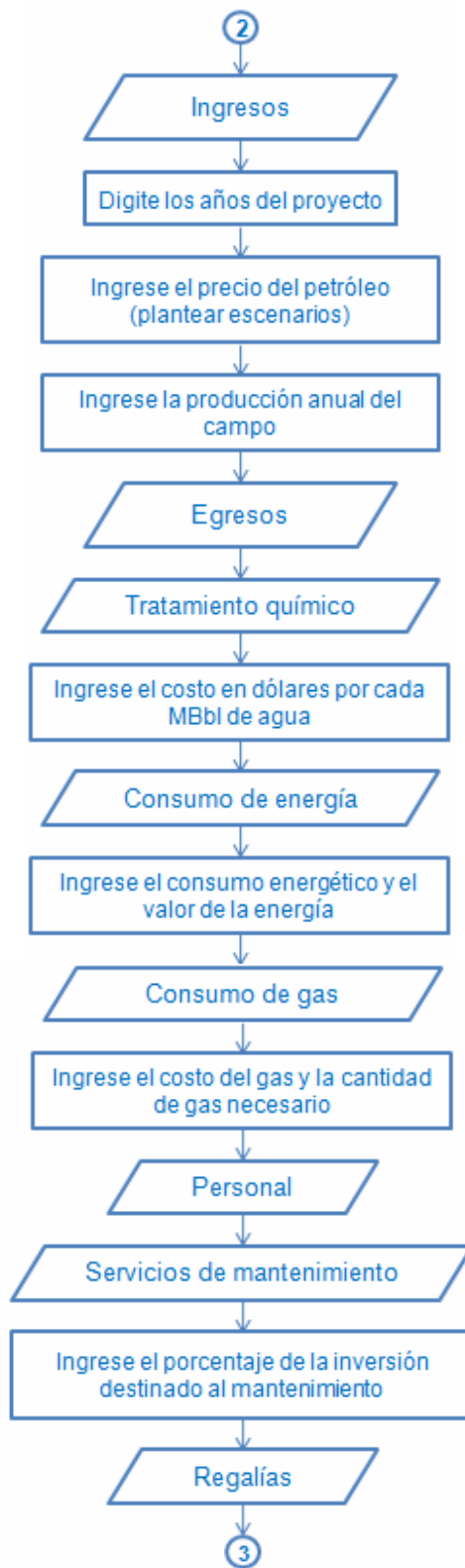
El programa para computador Crystal Ball[®] permite la construcción de modelos en combinación con Excel[®]. Una vez instalado, el programa genera una nueva categoría dentro de las funciones que tiene Excel[®]. Adicionalmente contiene una serie de macros que realizan los procesos de definición e incorporación de variables aleatorias, la simulación Montecarlo y la generación de reportes gráficos.

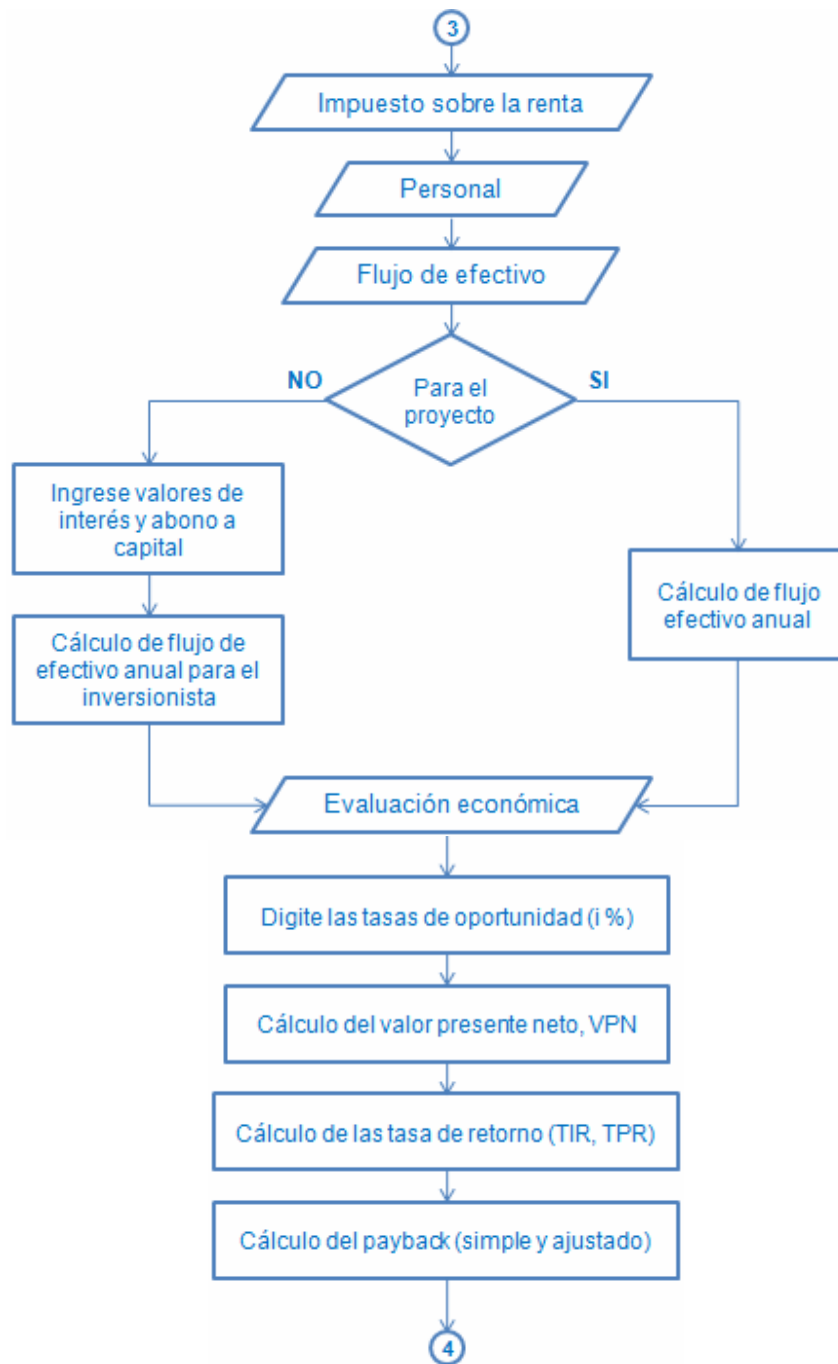
3.5. DIAGRAMA DE FLUJO

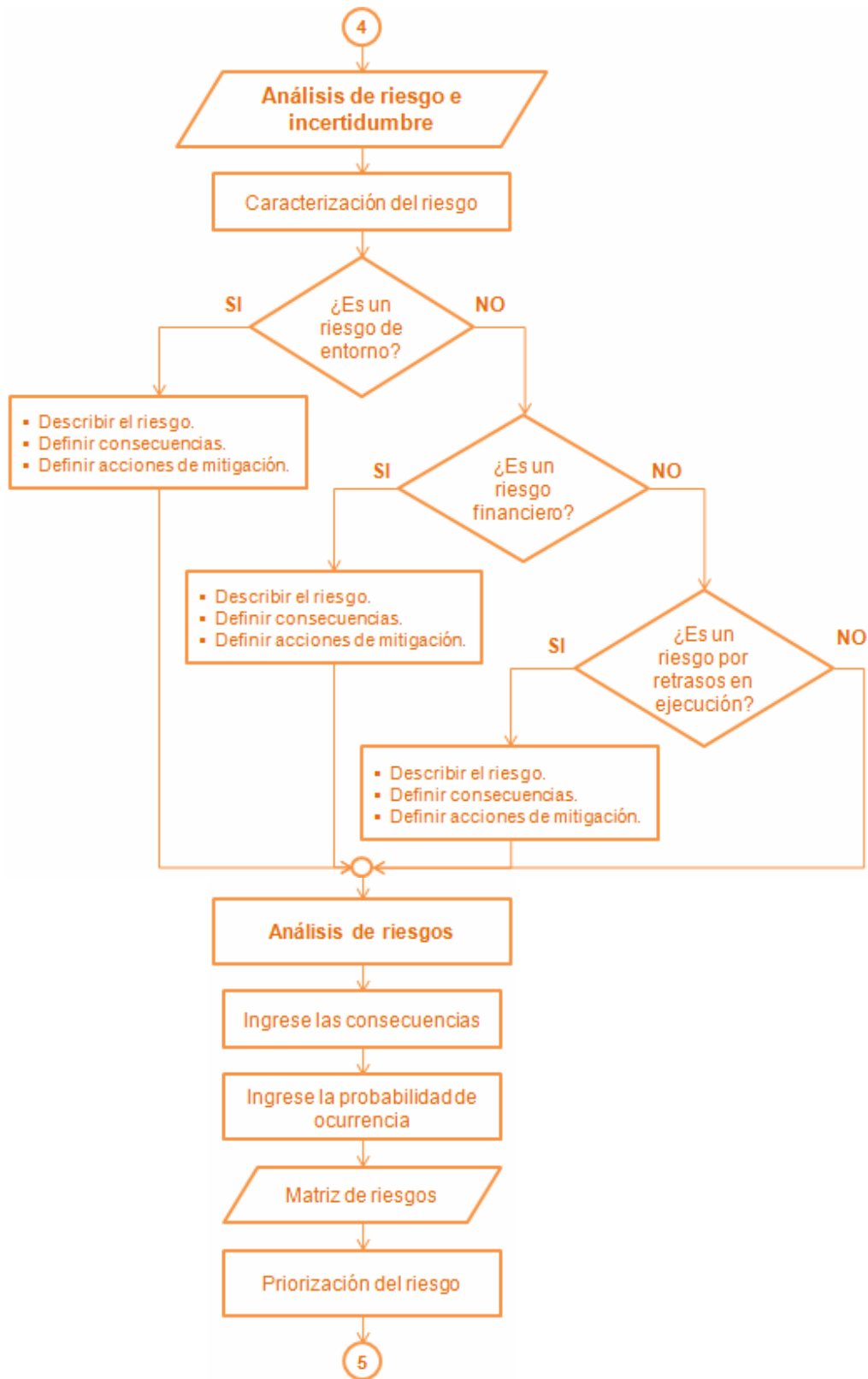
A continuación se presenta el diagrama de flujo de la metodología para la evaluación económica de un proyecto de inyección de vapor incorporando la rutina para analizar la incertidumbre.

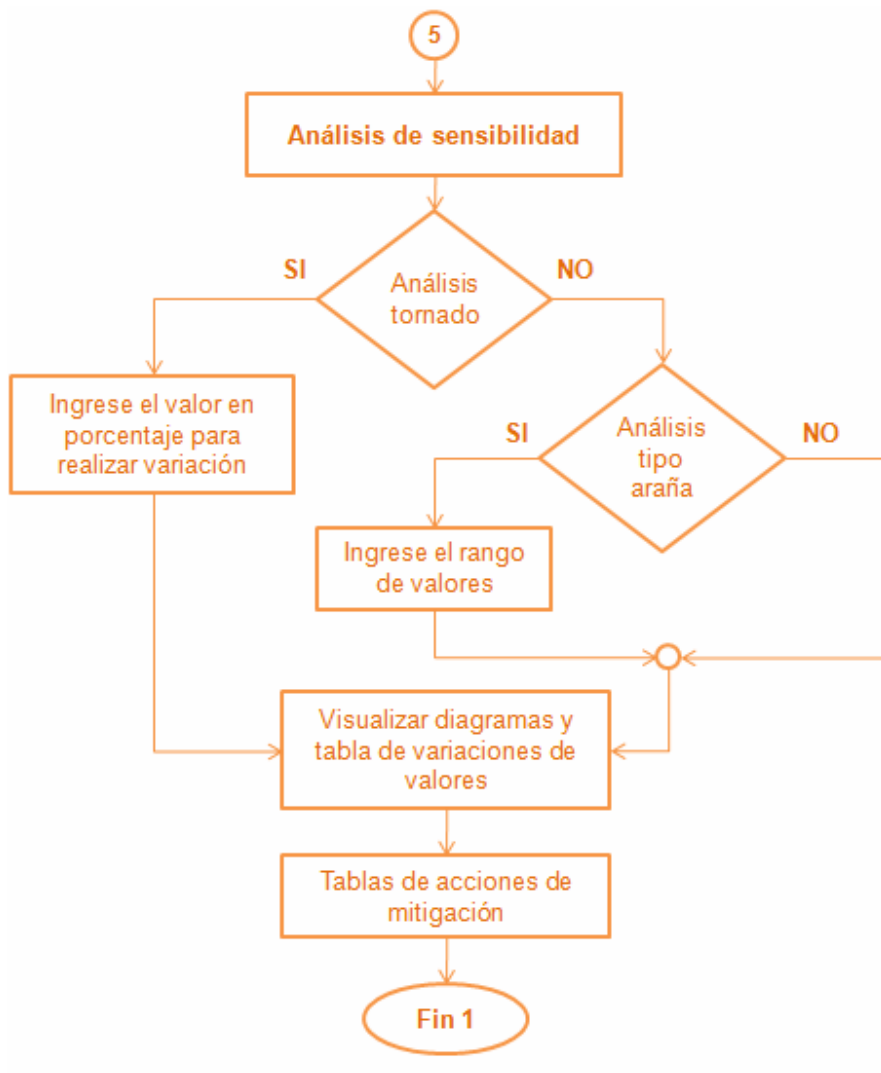


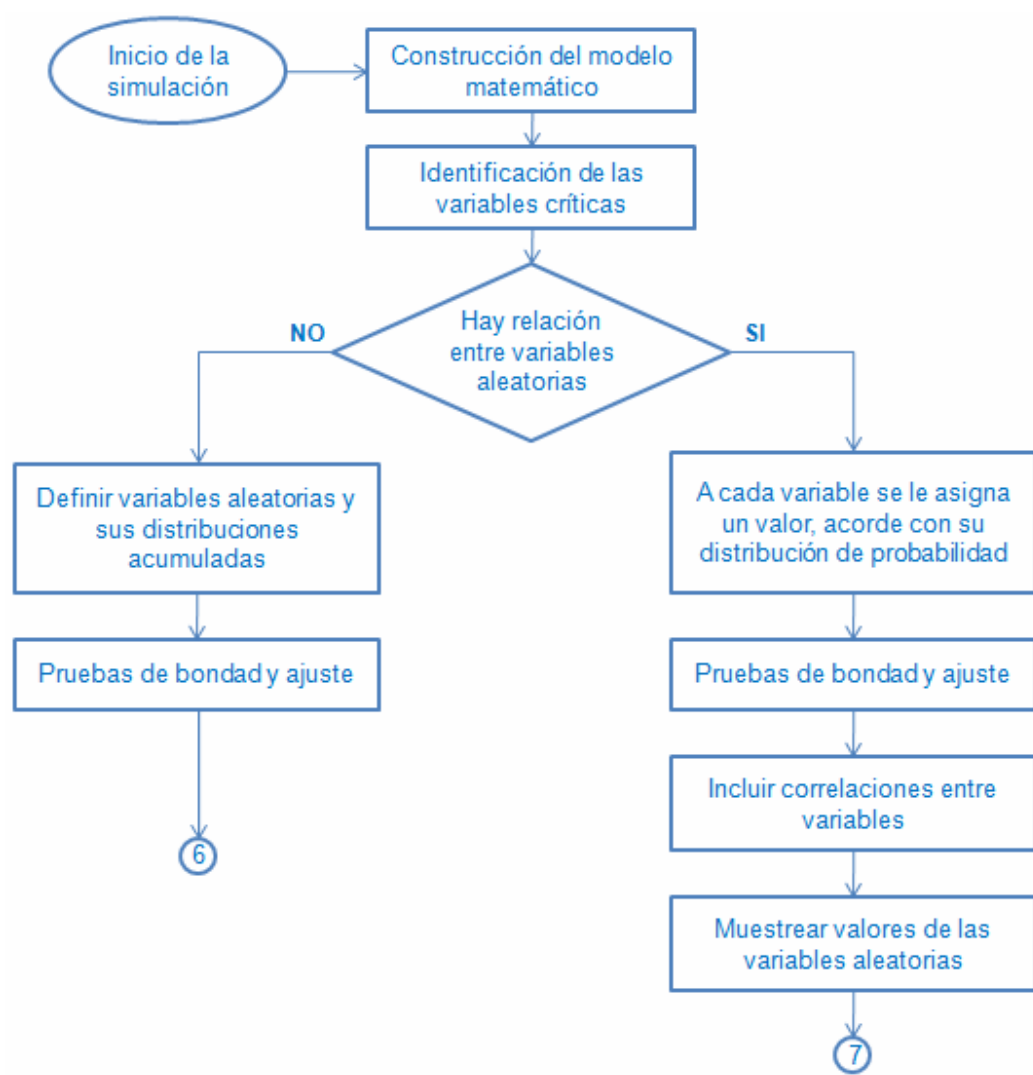


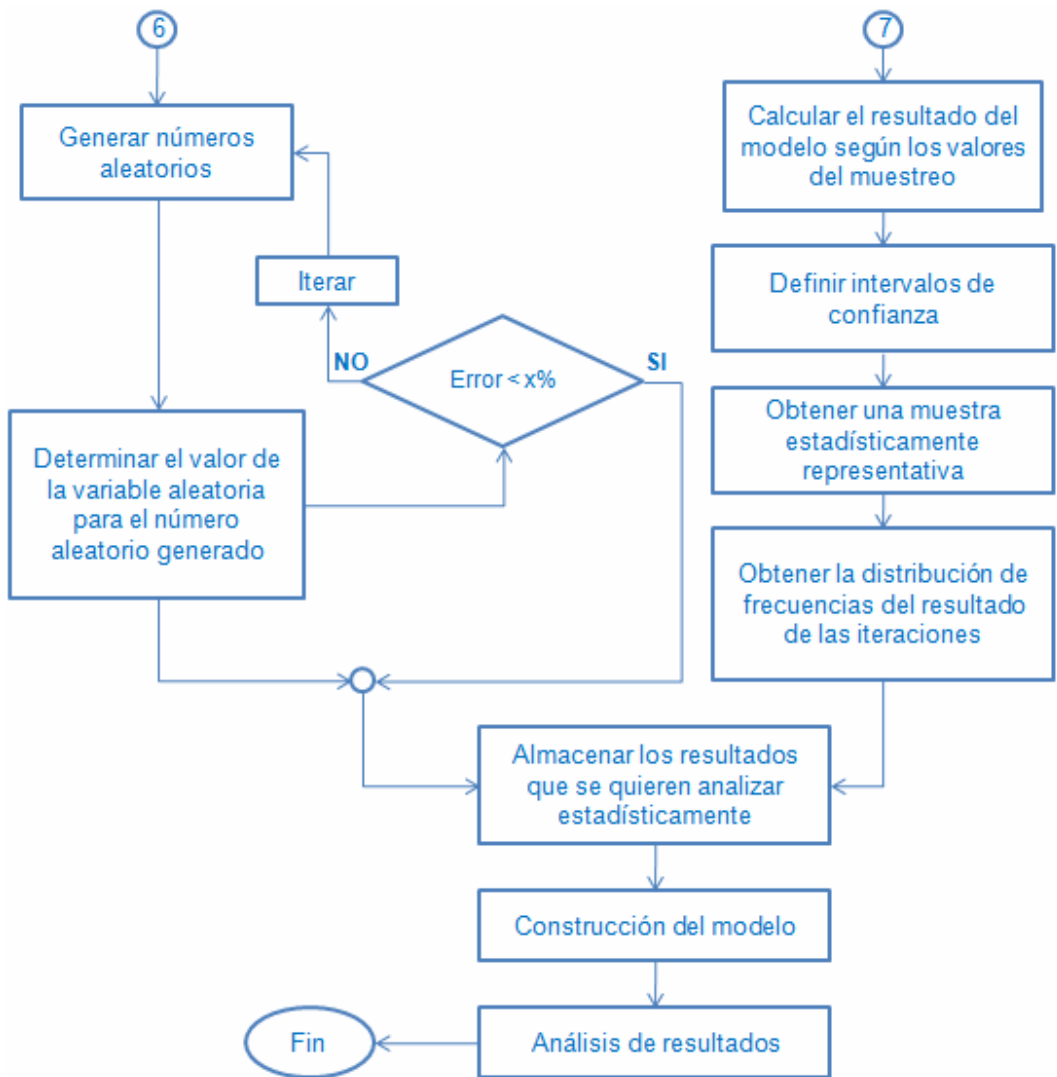












4. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

Para facilitar el entendimiento de la metodología propuesta, se plantea un ejemplo didáctico de aplicación en el cual se toma como referencia un proceso de inyección cíclica de vapor para un yacimiento hipotético en el cual previamente se conoce que el proyecto es técnicamente viable.

4.1. DESCRIPCION DEL PROYECTO

Para llevar a cabo este proyecto se consideran cuatro (4) pozos productores inyectoros cuyo costo de perforación es US\$ 2.489.700, distribuidos en cuatro patrones de inyección de cinco (5) puntos. Se requieren dos generadores móviles con una capacidad de 25 MMBTU/h cada uno. Este proyecto presenta una gran ventaja y es que ya cuenta con las facilidades tanto de tratamiento del agua de generación como las de tratamiento de los fluidos producidos. Para la adecuación del terreno donde se van a ubicar los pozos, se hacen obras civiles por un valor de US\$ 200.000. El tratamiento químico para el agua de generación tiene un costo aproximado de 10 US\$/kbbbls de agua tratada; el consumo de energía eléctrica para los equipos de generación tiene un costo de 0,052 US\$/kWh, el costo de consumo de gas natural es de 5,8 US\$/KPC.

Se toma un valor de 5% de la inversión para el mantenimiento de los equipos de generación; por concepto de regalías e impuesto de renta, se paga un valor del 5% por ser un proyecto de recobro mejorado, y 34% respectivamente. El tiempo de inyección es de 3 años, durante el cual se hacen 4 ciclos de estimulación con vapor.

4.2. EVALUACIÓN DETERMINÍSTICA DEL PROYECTO

Para realizar la evaluación económica del proyecto de inyección cíclica de vapor, se realizan los siguientes pasos:

- Determinar la infraestructura requerida la cual representa la inversión inicial para su implementación, ver *Tabla 1*.
- Calcular los ingresos por año, ver *Tabla 2*.
- Se hallan los egresos, que corresponden a los costos de operación, mantenimiento y los impuestos, en donde se toma un incremento del 5% en los costos, con lo cual se obtienen los egresos totales de operación y mantenimiento para el proyecto, como se observa en la *Tabla 3*.
- Se calculan los flujos de efectivo anuales, con los cuales se determina el flujo de caja para el proyecto, como se observa en la *Tabla 4*.
- Utilizar el método de valor presente neto, VPN, para observar el retorno de la inversión y la viabilidad del proyecto.
- Determinar gráficamente el porcentaje que corresponde a cada uno de los costos involucrados en la generación de un millón de BTU, del costo total.

Tabla 1: Valor total de la inversión para inyección cíclica.

INVERSIÓN INICIAL	
Descripción	Costo US\$
Pozos	2.489.700
Generador de vapor	1.100.000
Líneas de distribución	4.720
Equipo de tratamiento de agua de generación	-
Equipo de tratamiento de agua de producción	-
Obras civiles	200.000
TOTAL	3.794.420

Fuente: Los Autores.

Tabla 2: Ingresos del proyecto.

INGRESOS			
Tiempo	Precio del petróleo	Producción	Ingresos
Años	US\$/bbl	bbl/año	US\$
1	40	170.454	6.818.160
2	40	147.709	5.908.360
3	40	130.453	5.218.120

Fuente: Los Autores.

Para determinar los ingresos del proyecto, dados por la producción y el precio del crudo; éstos se obtuvieron de simulación numérica y formulación de escenarios, respectivamente. El análisis de escenarios permite recrear situaciones que se pudieran presentar en el futuro del proyecto u oportunidad de negocio, y de esa forma se visualizan los riesgos y oportunidades implícitas. Lo típico es que se construya como mínimo un escenario probable, uno optimista y otro pesimista y así se mejore la percepción del riesgo del proyecto. Por esto, una situación en la que es deseable contar con un análisis de escenarios es cuando una de las variables dependientes tiene un impacto muy marcado en el resultado final, como ocurre con el precio del petróleo, el cual por su importancia relativa, opaca el impacto de las otras.

Para el caso de estudio, para efectos de evaluar la economía del proyecto, no se asigna importante probabilidad al rango de precios entre 30 y 40 US\$/bbl, es decir, se considera poco probable que se vuelva a una época de bajo costo del petróleo y por lo tanto de los energéticos en general.

Los rangos de precios más probables se encuentran entre 40 y 80 US\$/bbl; los escenarios pesimista, probable y optimista, están dados por los valores de 40, 60 y 80 US\$/bbl respectivamente. En esta aplicación y conforme a sugerencias basadas en experiencias con análisis económicos reales en

proyectos de crudos pesados, se tomará un precio del petróleo de 40 US\$/bbl, tomando en cuenta que este es un rango muy amplio para hacer estudios concretos de inversiones e infraestructura.

Hacer proyecciones respecto al precio del petróleo, es un asunto delicado, debido a las incertidumbres que plantea el futuro lejano. No obstante, se visualiza con mucha mayor probabilidad el encarecimiento del petróleo a niveles que podrían disparar problemas de acceso a la energía para la población en general, contemplando que los problemas derivados de la restricción de la oferta se harán mayores.

Esta forma de representar los escenarios, es un reflejo de la incertidumbre en la evolución futura del precio del petróleo y de las dificultades encontradas para modelar la proyección de esa variable mediante una curva, o set de curvas. Por su parte, el efecto de los problemas de escasez de oferta (o exceso de demanda) se observa en que los mercados probablemente estén anticipando el agotamiento de fuentes, por esa razón, los precios no volverían a niveles como los del pasado, pero tenderían a subir respecto a los niveles actuales.

Tabla 3: Egresos del proyecto.

TOTAL OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO			
	AÑOS		
	1	2	3
Vapor usado (MMBTU)	350.400	350.400	350.400
Operación (US\$/MMBTU)	6,66	6,92	7,20
Total Operación	2.333.044	2.426.365	2.523.420
Mantenimiento	18.972	19.731	20.520
TOTAL O&M	2.352.016	2.446.096	2.543.940

Fuente: Los Autores.

Tabla 4: Flujo de caja del proyecto.

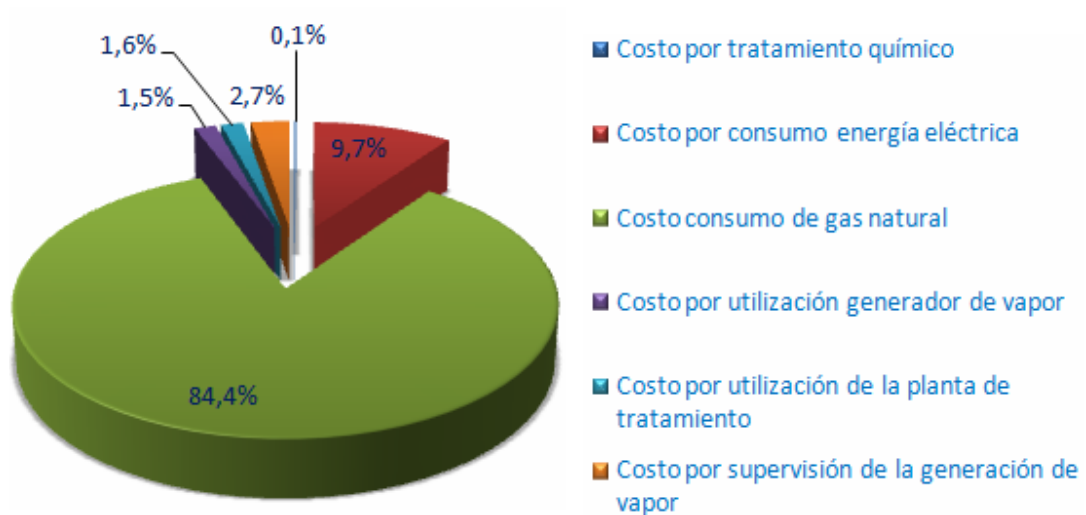
FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO				
Año	0	1	2	3
Inversión	3.794.420			
Ingresos (+)		6.818.160	5.908.360	5.218.120
Regalías (-)		340.908	295.418	260.906
Operación y mantenimiento (-)		2.352.016	2.446.096	2.543.940
Depreciación (-)		758.884	1.197.974	1.197.974
Ganancias antes de impuestos		3.366.352	1.968.872	1.215.300
Impuesto de renta (-)		1.144.560	669.416	413.202
Ganancias después de impuestos		2.221.792	1.299.455	802.098
Depreciación (+)		758.884	1.197.974	1.197.974
Capital de trabajo (-)	340.908	-45.490	-34.512	0
Flujo de caja total	-4.135.328	3.026.166	2.531.941	2.000.072

Fuente: Los Autores.

A continuación se presenta la evaluación económica, mediante el método del VPN. Finalmente se presentan los resultados, con los cuales se determina la viabilidad económica del proyecto, tomando en cuenta que la evaluación no contempla ningún tipo de riesgo.

Los resultados incluyen gráfica y tabla del costo por generar 1 MMBTU, ver *Figura 33* y *Tabla 5*, y la relación de la tasa de oportunidad con el VPN, *Figura 34*.

Figura 33: Gráfica en porcentaje del costo por MMBTU.



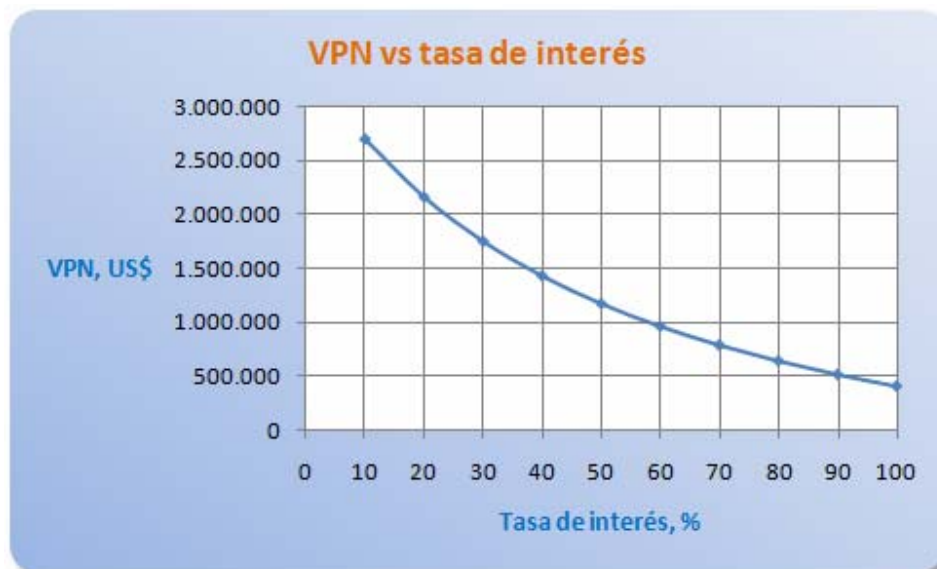
Fuente: Los Autores.

Tabla 5: Costo por MMBTU.

COSTO POR MMBTU	
Costo por tratamiento químico	0,01
Costo por consumo energía eléctrica	0,67
Costo consumo de gas natural	5,80
Costo por utilización generador de vapor	0,10
Costo por utilización de la planta de tratamiento	0,11
Costo por supervisión de la generación de vapor	0,18
Costo Total (US\$/MMBTU)	6,87
RAV (Bbl/Bbl Agua)	0,24

Fuente: Los Autores.

Figura 34: Gráfica VPN del proyecto.



Fuente: Los Autores.

La evaluación económica muestra que este proyecto es muy viable, ya que con tasas de oportunidad de hasta el 100%, el valor presente neto (VPN) es positivo, representando una ganancia bastante atractiva al final del proyecto.

Bajo esta condición de viabilidad y rentabilidad del proyecto, es importante evaluar el comportamiento del riesgo o incertidumbre, ya que no se tiene certeza sobre los flujos de caja futuros que ocasionará cada inversión. El propósito de realizar el siguiente análisis de riesgo e incertidumbre, es el poder ofrecer elementos de juicio que permitan mejorar la calidad y la efectividad de las decisiones.

4.3. ANÁLISIS DE RIESGO E INCERTIDUMBRE

Para el proyecto de inyección cíclica de vapor, los riesgos se clasificaron en tres categorías: *riesgos de entorno*, *riesgos financieros* y *riesgos por retrasos en ejecución*. Como se definió en el capítulo anterior, para poder caracterizar el riesgo, es necesario describir el riesgo, mediante la definición de las consecuencias que conlleva este riesgo, y las posibles acciones de mitigación.

En las siguientes tablas, se muestra el proceso inicial para emprender el análisis de riesgo e incertidumbre. Ver *Tabla 6, 7 y 8*.

Tabla 6: Caracterización del riesgo de entorno.

	Riesgo de entorno	Consecuencias de este riesgo, estimando el valor de los posibles daños	Acciones de mitigación
E.1	Seguridad física del personal	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Accidentes de trabajo ▪ Fatalidad 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Implementar capacitación periódica y recordatorios permanentes sobre la seguridad para todo el personal operativo ▪ Realización de los ejercicios periódicos relacionados con los procedimientos de emergencia.
E.2	Seguridad física de las instalaciones	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Retraso en las operaciones ▪ Contaminación de la localización ▪ Accidentes de trabajo ▪ Incremento en inversiones de capital 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Seguimiento a inspecciones previas y a instalación (Supervisión) ▪ Caracterización de áreas con susceptibilidad ambiental.
E.3	Orden público	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Retraso en las operaciones ▪ Malestar e inconformidad 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Implementación de una política de seguridad

		<p>de los trabajadores</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Retiro de personal especializado ▪ Demora en trámites 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Movilización de fuerza pública
E.4	Agentes climáticos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Problemas operacionales ▪ Retraso en las operaciones ▪ Fallas en el sistema eléctrico ▪ Problemas de acceso al campo 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definir con un buen grado de aproximación cuáles serán los efectos de los diversos agentes climáticos y la forma de proteger las instalaciones de éstos. ▪ Descripción general del ambiente, tarea que deberá incluir al menos la geología, la hidrología, la climatología, los suelos y la vegetación.
E.5	Impacto ambiental de emisiones y vertimientos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reclamaciones de comunidades, cierre del campo. ▪ Contaminación de la localización ▪ Parar las operaciones por parte del ministerio ▪ Vertimientos por fuera de especificaciones ▪ Daños al medio ambiente 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Continuación y validación de la capacidad de tratamiento actual y proyección futura ▪ Seguimiento diario a través del interventor ambiental y supervisión por parte del Jefe de Pozo. ▪ Hacer cumplir procedimientos de cargue y descargue de fluidos contaminantes establecidas por parte del operador. ▪ Requerir que se controlen los vapores de hidrocarburos en todos los puntos de transferencia de petróleo o gas, y que se limpie, oportunamente, todo derrame de petróleo. ▪ En el caso de que se produzca cualquier derrame operacional o catastrófico, detectarlo oportunamente, y responder efectivamente.

Tabla 7: Caracterización del riesgo financiero

	Riesgo financieros	Consecuencias de este riesgo, estimando el valor de los posibles daños	Acciones de mitigación
F.1	Volatilidad del precio de los hidrocarburos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Falta de información confiable ▪ Proyecciones de inversiones sujetas a incertidumbre frente a la rentabilidad del proyecto ▪ Bajo interés en decisiones de inversión 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Diseñar un portafolio de cobertura de riesgos apoyado en los indicadores históricos del mercado, esto permitirá mejorar la planeación financiera de los flujos de caja reduciendo la exposición ante dicha variación. ▪ Hacer uso del método estadístico valor en riesgo, obteniendo una medida de las posibles pérdidas de un portafolio de inversión, o la pérdida máxima sobre un horizonte de tiempo dado, de tal manera que exista una baja probabilidad de que ocurran pérdidas mayores.
F.2	Caracterización inadecuada del yacimiento	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No se cumple el pronóstico de producción ▪ Disminución de los ingresos del proyecto 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Monitoreo del proyecto de inyección de vapor para verificar el modelo geológico y corregirlo en el caso que sea necesario, por tal motivo, es indispensable que exista una adecuada caracterización previa para que el proyecto sea útil. ▪ Realizar una adecuada administración de yacimientos involucrando la planificación, implementación, monitoreo, evaluación y revisión de los procesos desarrollados en un campo petrolero, esto con el fin de formular los planes adecuados y luego implementarlos con un equipo de trabajo interdisciplinario e integrado, logrando una descripción detallada y confiable del yacimiento.

F.3	Volumen no esperado de hidrocarburos producidos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Incumplimiento de pronósticos de producción ▪ En algunos casos se cumple la tasa producción inicial, pero la producción no se mantiene en las primeras etapas del proyecto. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Continuar con revisión del estudio integrado del yacimiento para validarlo con la información nueva
F.4	Costos de consumo de gas natural	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sobrecostos por inversiones adicionales ▪ Retrasos en las operaciones 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Acordar precio y disponibilidad para asegurar las proyecciones de gastos e inversiones ▪ Incrementar la confiabilidad debido a los costos por MBTU que representa para el proyecto este gasto.
F.5	Costos para tratamiento de crudo y agua	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sobrecostos por inversiones adicionales. ▪ Retrasos en las operaciones 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Evaluar la clase y cantidad de químicos ya que dependen de la calidad y cantidad de agua y crudo. ▪ Diseñar planes de monitoreo permanente que identifiquen los puntos que originan el riesgo.
F.6	Altos costos de operación	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sobrecostos por inversiones adicionales. ▪ Retrasos en las operaciones 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mejorar la planeación financiera de los flujos de caja reduciendo su exposición ante la presencia de sobrecostos. ▪ Reducir la probabilidad de que ocurran pérdidas mayores. ▪ Obtener una medida de las posibles pérdidas del portafolio de inversión para el proyecto.
F.7	Realización y adecuación de nuevas obras civiles	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sobrecostos por inversiones adicionales ▪ Retrasos en el proyecto y las operaciones 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Operar eficientemente ▪ Cumplimiento del cronograma planteado

F.8	Abandonar pozos por problemas mecánicos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Limitaciones de infraestructura ▪ Problemas operativos ▪ Disminución de la producción 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Incrementar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos ▪ Planes de mantenimiento: minimizar costos, maximizando seguridad, disponibilidad y confiabilidad. ▪ Estudiar y evaluar la decisión de abandono, partiendo de los sobrecostos generados con la convivencia del riesgo.
-----	--	---	--

Tabla 8: Caracterización del riesgo por retrasos en ejecución

	Riesgo por retrasos en ejecución	Consecuencias de este riesgo, estimando el valor de los posibles daños	Acciones de mitigación
R.1	Demoras en el proceso de compra de materiales	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desgaste en la ejecución del proyecto. ▪ Cumplimiento del cronograma planteado. ▪ Retrasos en la instalación de equipos. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Contar con un equipo experimentado y organizado de forma tal, que pueda asegurar la planeación, dirección y control de recursos con el propósito último de lograr las especificaciones técnicas, de costo, y de tiempo del proyecto. ▪ Diseñar acciones relacionadas con los procesos y la tecnología que permitan alcanzar los estándares de calidad deseados, sin afectar los costos de una manera significativa.
R.2	Disponibilidad de la infraestructura necesaria	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Limitaciones de infraestructura ▪ Atraso de cronograma 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Buena estructura del proyecto de inyección de vapor. ▪ Fomentar confianza de los distribuidores y proveedores de equipos y materiales. ▪ Seguridad del mercado.

R.3	Paradas inesperadas de equipos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fallas operacionales que generan sobrecosto. ▪ Retrasos en el proyecto. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Supervisión de la operación ▪ Programa de inspección: definir y realizar aquellas actividades necesarias para detectar el deterioro en servicio de los equipos antes de que se produzcan las fallas ▪ Elaborar un ranking de criticidad basado en riesgo de los equipos y mantenerlo actualizado.
R.4	Fallas en el equipo de levantamiento	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desgaste Operacional ▪ Trabajos de mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Evaluar los modos de falla más probables y los tipos de daño asociados ▪ Mantenimiento preventivo de equipos y herramientas ▪ Elaborar procedimientos genéricos de inspección
R.5	Disponibilidad del gas natural	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Retrasos y demoras en la operación. ▪ Afectación en producción 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Buena estructura del proyecto de inyección de vapor ▪ Fomentar confianza de los distribuidores en la estabilidad del proyecto ▪ Seguridad del mercado
R.6	Fallas en las líneas de conducción de fluidos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Incrementos en los costos de operación. ▪ Disminución de producción. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Evaluar los modos de falla más probables y los tipos de daño asociados. ▪ Mantenimiento preventivo. ▪ Elaborar procedimientos genéricos de inspección.

El paso siguiente consiste en analizar el riesgo; en esta etapa se valora el riesgo (basado en supuestos) de acuerdo con la probabilidad de ocurrencia y las consecuencias y/o impacto. Este análisis semicuantitativo, hace una aproximación inicial al riesgo, y su distribución en los colores de la matriz, permite facilitar la identificación y además define los criterios sobre los niveles del riesgo para iniciar la priorización. Ver *Figura 35, Tabla 9, 10 y 11.*

Tabla 9: Análisis semicuantitativo. Riesgos de entorno

ENTORNO		Consecuencias y/o Impacto	Probabilidad de ocurrencia	P x I
E.1	Seguridad Física del personal	100	1	100
E.2	Seguridad física de las instalaciones	50	1	50
E.3	Orden público	15	2	30
E.4	Agentes climáticos	50	2	100
E.5	Impacto ambiental de emisiones y vertimientos	100	2	200

Fuente: Los Autores.

Tabla 10: Análisis semicuantitativo. Riesgos financieros

FINANZAS		Consecuencias y/o Impacto	Probabilidad de ocurrencia	P x I
F.1	Volatilidad del precio de los hidrocarburos	100	10	1000
F.2	Caracterización inadecuada del yacimiento	100	2	200
F.3	Volumen no esperado de hidrocarburos producidos	100	5	500
F.4	Costos de consumo de gas natural	100	10	1000
F.5	Aumento de la tasa de interés	50	2	100
F.6	Costos para tratamiento del crudo y agua	15	2	30
F.7	Altos costos de operación	50	2	100
F.8	Realización y adecuación de nuevas obras civiles	15	2	30
F.9	Abandonar pozos por problemas mecánicos	15	2	30

Fuente: Los Autores.

Tabla 11: Análisis semicuantitativo. Riesgos por retrasos en ejecución.

RETRASO EN LA EJECUCIÓN		Consecuencias y/o Impacto	Probabilidad de ocurrencia	P x I
R.1	Demoras en el proceso de compra de materiales	50	2	100
R.2	Disponibilidad de la Infraestructura necesaria	15	1	15
R.3	Paradas inesperadas de equipos	1	2	2
R.4	Fallas en el equipo de levantamiento	15	5	75
R.5	Disponibilidad de gas natural	15	1	15
R.6	Fallas en las líneas de conducción de fluidos	5	5	25

Fuente: Los Autores.

Figura 35: Matriz de riesgos del proyecto.

CONSECUENCIAS Y/O IMPACTO		PROBABILIDAD DE OCURRENCIA							
		VALORACIÓN			REMOTO	IMPROBABLE	POSIBLE	PROBABLE	FRECUENTE
		A	B	C	D	E			
		0,5	1	2	5	10			
Crítico	5	100		E.1	E.5 - F.2	F.3	F.1 - F.4		
Alto	4	50		E.2	E.4 - F.5 F.7 - R.1				
Moderado	3	15		R.2 - R.5	E.3 - F.6 F.8 - F.9	R.4			
Menor	2	5				R.6			
Bajo	1	1			R.3				

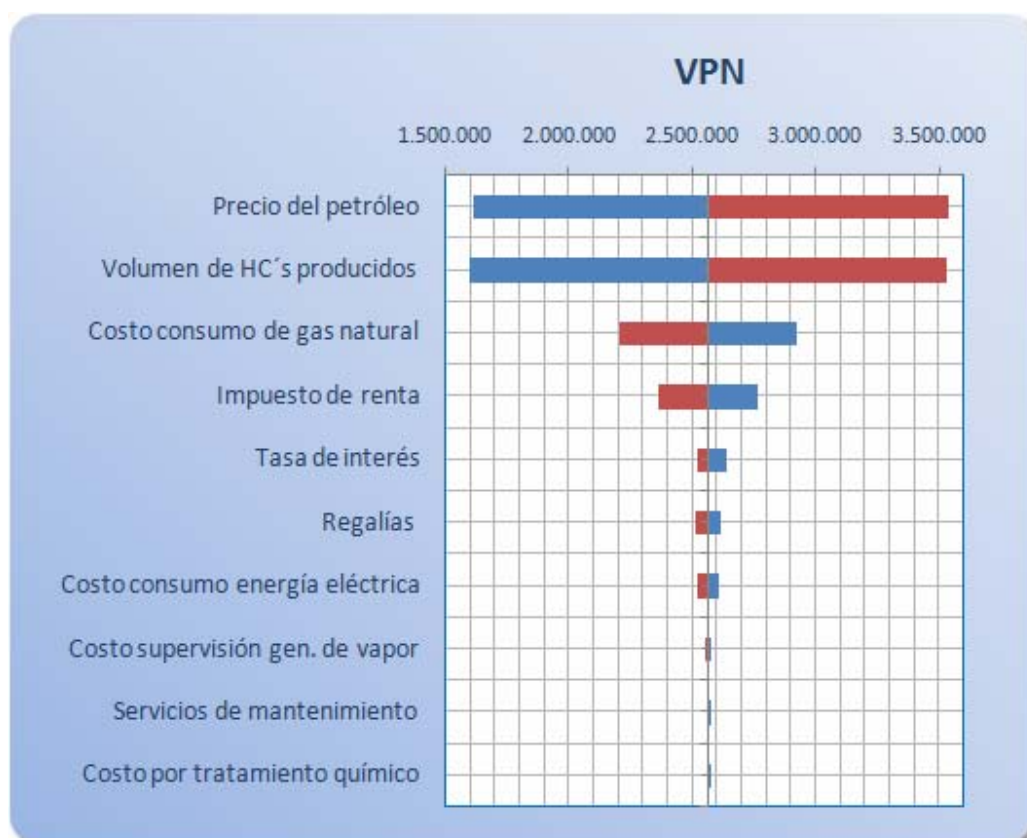
Fuente: Los Autores.

Para confirmar la priorización hecha con el procedimiento anterior, es necesario iniciar un análisis de sensibilidad mediante el uso de diagramas tornado y tipo araña. Por ser un acercamiento inicial a la medición del riesgo, permite definir criterios para establecer el grado de exposición del proyecto, y de esta forma es posible distinguir entre los riesgos aceptables, tolerables,

moderados, importantes y fijar las prioridades de las acciones requeridas para su tratamiento.

Para poder asociar cada riesgo al valor presente neto, VPN, del proyecto, es necesario vincularlos a las variables que evalúan la economía y viabilidad del proyecto. En este caso, las variables independientes son: el precio del petróleo, la producción, términos fiscales (tasa de interés, impuestos de renta y regalías) y los costos involucrados en la generación de vapor. En el análisis tornado, las variables son modificadas en un 10% del valor del caso base. Ver *Figura 36*.

Figura 36: Análisis de sensibilidad tipo tornado.

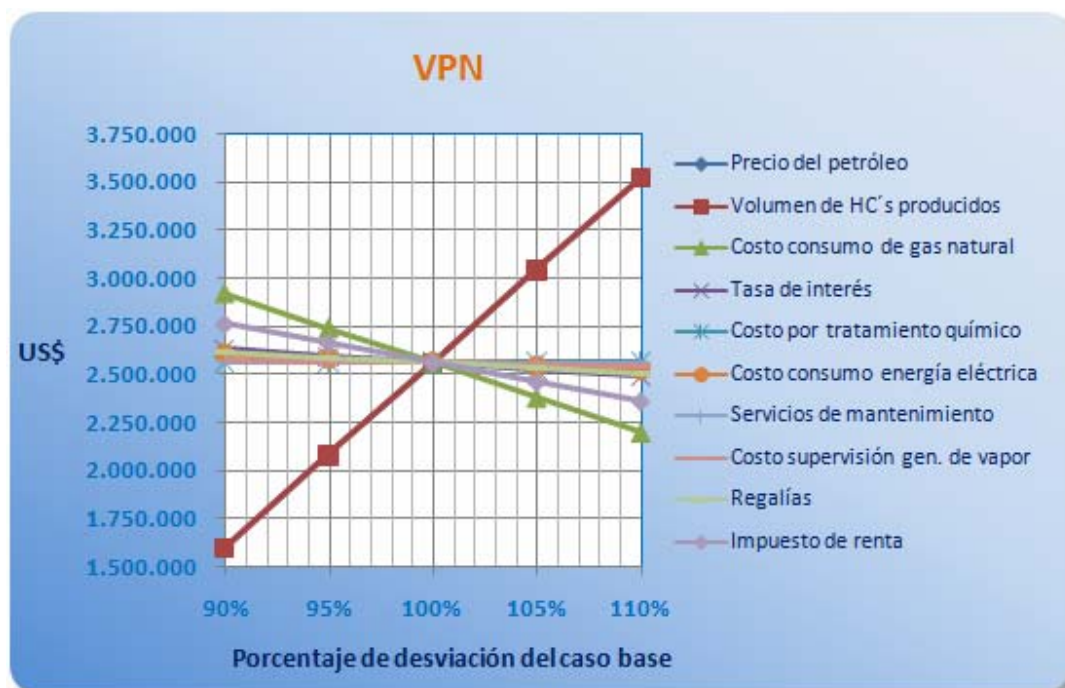


Fuente: Los Autores.

Como se observa en la figura anterior, los retornos esperados son fuertemente condicionados por los ingresos del proyecto, y para los egresos, el costo por consumo de gas natural, dado en US\$/MBTU, representa mayor exposición para el flujo de caja debido a su variación.

Como se definió en el capítulo anterior, el análisis tipo araña permite observar los retornos esperados a partir de la variación de las incertidumbres presentes en el proyecto, en un rango de porcentajes respecto a su valor original. Para este caso, se hace una variación de -10% y +10% del caso base. Como se muestra en la *Figura 37*, este rango se encuentra entre el 90% y 110%.

Figura 37: Análisis de sensibilidad tipo araña.



Fuente: Los Autores.

La gráfica anterior, confirma la información establecida y mostrada en el análisis tornado, ya que el precio del crudo y la producción se muestran en segmentos superpuestos con mayor inclinación de los demás, demostrando que estos parámetros son más significativos para el cálculo del VPN.

Como se definió en el capítulo anterior, la simulación de Montecarlo es una herramienta muy útil; sin embargo, para poder utilizarla efectivamente es necesario haber evaluado y valorado cada una de las variables críticas que afectan el proyecto. Para realizarlo, se requiere describir cada una de ellas utilizando las distribuciones que mejor reflejen sus posibles variaciones. Esto es importante, ya que usar distribuciones de frecuencia que no han sido adecuadamente seleccionadas, o en las que las correlaciones entre las mismas no han sido bien establecidas pueden llevar a la generación de errores grandes en la medición y caracterización del riesgo.

A partir de la evaluación determinística realizada anteriormente del proceso de inyección cíclica de vapor, la interpretación de la gráfica del VPN mostró que para el proyecto la inversión resulta muy atractiva y genera beneficios adicionales. Con el propósito de mejorar la percepción del riesgo y de hacer proyecciones de la aplicación del proceso; se realizó un estudio para dos cluster de inyección de vapor que contienen ocho pozos cada uno, en total 16 pozos. Este ejemplo se basa en la misma suposición de viabilidad técnica del proyecto de 4 pozos inyector-productor evaluado anteriormente, y que además los pozos ya están perforados, por lo tanto los costos de infraestructura no se contemplan.

Para determinar los ingresos del proyecto, dados por la producción y el precio, estos se obtuvieron de simulación numérica y de análisis de escenarios. En la *Figura 38*, se muestra el tratamiento realizado para calcular el precio del petróleo. En este caso, este valor oscila entre 40 y 80 US\$/bbl,

con una media de 60 US\$/bbl, y se definió como una distribución triangular. Los escenarios pesimista probable y optimista, están dados por este rango de valores, además se restaron ajustes y tarifas por calidad y transporte.

Figura 38: Evaluación para precio del petróleo.

PRECIO DEL PETRÓLEO					
WTI					
Años	2009	2010	2011	2012	2013
Precio del petróleo (US\$/BL)	47,51	54,98	50,46	61,23	70,03
Ajuste por calidad	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87
Tarifa por transporte	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Precio en cabeza del pozo (US\$/BL)	45,14	52,61	48,09	58,86	67,66

Fuente: Los Autores.

Para determinar el comportamiento de la producción al implementar el proceso, ésta se obtuvo de realizar simulación numérica a un solo pozo, ya que para los demás, se decidió representar la incertidumbre que existe en la caracterización del yacimiento y su impacto en la producción esperada mediante un factor de calidad del yacimiento. A este factor se le asignó una distribución triangular el cual oscila entre 0,8 y 1,2 con un valor probable de 1. De esta forma se espera que la producción para los 16 pozos sea diferente y se represente el riesgo dentro de este rango de incertidumbre.

Para cuantificar los costos operativos, OPEX, se realizó una tabla donde se presenta para cada año los gastos relacionados a su ejecución. Como se observa en la *Figura 39*, a los valores resaltados en color verde, también se les asignó una distribución triangular, ya que era necesario definir un rango de valores que impliquen o no sobrecostos.

Figura 39: Comportamiento costos operativos, OPEX.

OPEX						
	Factor	2009	2010	2011	2012	2013
Vapor usado MBTU		700800	700800	700800	700800	700800
OPERACIÓN						
Costo tratamiento químico (US\$/MBTU)	10,00	0,0074	0,0077	0,0081	0,0084	0,0087
Costo consumo de energía eléctrica (US\$/MBTU)	0,0517	0,334	0,347	0,361	0,375	0,390
Costo por consumo de gas natural (US\$/MBTU)	5,80	5,80	6,03	6,27	6,52	6,79
Costo utilización del generador (US\$/MBTU)	1.000.000	0,114	0,119	0,123	0,128	0,134
Costo utilización planta de tratamiento (US\$/MBTU)	750.000	0,107	0,111	0,116	0,120	0,125
MANTENIMIENTO						
Servicio mantenimiento (KUS\$/pozo)	1.050	16,80	16,80	16,80	16,80	16,80
Workover (KUS\$/pozo)	8.700	43,50	43,50	43,50	43,50	43,50
Total OPEX variable (KUS\$/Año)		4.518,96	4.697,31	4.882,79	5.075,69	5.276,30

Fuente: Los Autores.

Las tres formas como se evidencia el riesgo en el proyecto son con la disminución del precio del crudo y de la producción, y con los retrasos en la ejecución. Por esto, dentro del flujo de caja, *Figura 40*, para manejar las incertidumbres asociadas con la disminución de la producción, estas se reportan como producto de paradas inesperadas de equipos. A esta variable se le asignó una distribución triangular teniendo en cuenta que maneja un valor mínimo de 1000 bbl promedio por año y un máximo de 2500 bbl, con un valor probable de 1500 bbl. Como se puede observar en la figura, el costo que mayor incidencia tiene en los egresos del proyecto es el costo por consumo de gas natural, además para este caso, se consideraron los costos por mantenimiento asociado a las operaciones de workover.

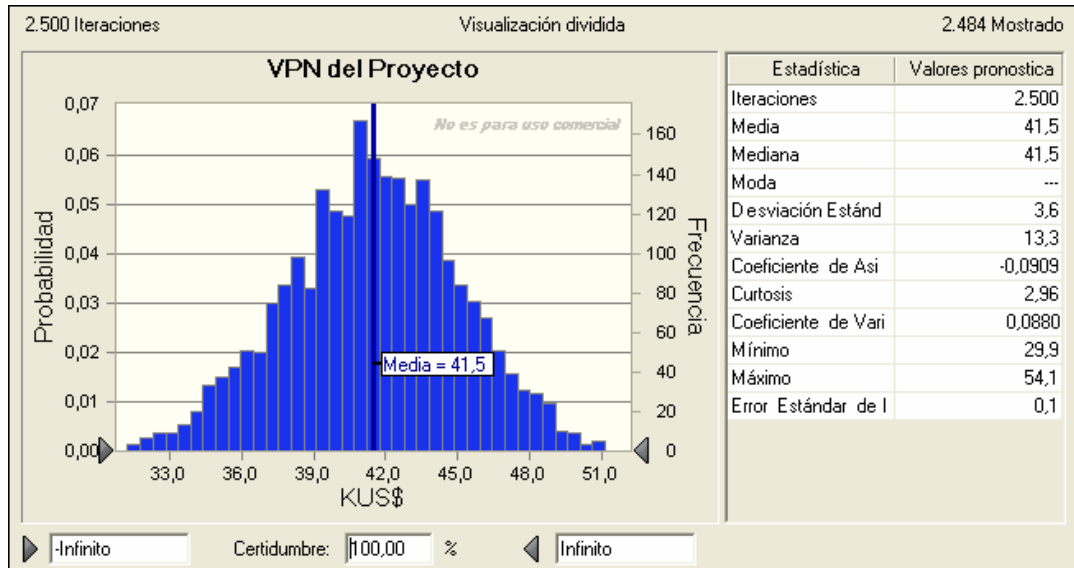
Figura 40: Esquema flujo de caja del proyecto.

FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO						
	VPN MUS\$ (12%)	2009	2010	2011	2012	2013
INGRESOS						
Producción afectada por paradas inesperadas, kBbl		1,08	1,34	2,25	1,87	1,51
Producción de petróleo, kBbl	5.464,6	1.261,0	939,6	1.310,4	1.182,5	771,2
Venta de Petróleo, US\$	78,6	21,6	18,6	23,8	26,1	19,4
Royalties	3,9	1,1	0,9	1,2	1,3	1,0
INGRESO BRUTO	74,7	20,5	17,7	22,6	24,8	18,5
OPEX						
Operación	17,5	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3
Variable	17,5	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3
TOTAL OPEX	17,5	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3
IMPUESTOS		5,6	4,5	6,2	6,9	4,6
FLUJO DE CAJA (KUS\$)	37,2	10,4	8,4	11,5	12,8	8,6
Flujo de caja descontado	37,2	9,3	6,7	8,2	8,1	4,9
TÉRMINOS FISCALES						
Tasa de descuento		12%				
% Impuesto		35%				

Fuente: Los Autores.

A partir del flujo de caja o de la alternativa de inversión, se puede calcular el VPN del proyecto. Aquí se pueden valorar los recursos económicos generados y gastados a lo largo de la vida útil del proyecto. Como se observa en la *Figura 41*, el reporte generado por Crystal Ball al realizar la simulación Montecarlo, se observa que el rango de incertidumbre está por encima de cero, con una media de 41,5 KUS\$, mostrando que el proyecto genera caja. Al tener en cuenta que al valorar las variables que implican riesgo e incertidumbre en la evaluación económica, éstas no generan pérdidas considerables, y más aun que el proyecto u oportunidad de negocio es atractivo, mejora la percepción del riesgo, y facilita tomar la decisión de invertir ya que no se incurre en la posibilidad de operar a pérdida.

Figura 41: Simulación VPN del proyecto.



Fuente: Crystal Ball 7.2

CONCLUSIONES

1. Al incorporar el análisis de riesgo e incertidumbre en la evaluación económica determinística de un proyecto de inyección de vapor, hace que el método de evaluación del proyecto se convierta en un proceso muy útil y efectivo, puesto que con la identificación, caracterización y medición de todos los riesgos existentes se mejora la planeación estratégica y facilita la toma de decisiones.
2. En un proyecto de inyección de vapor, las variables que presentan mayor incertidumbre son la producción del campo y el precio del petróleo, de ahí la importancia de realizar una adecuada gestión del riesgo que posibilite la mejora continua en el proceso del cumplimiento de objetivos y metas.
3. El planteamiento de la metodología propuesta se enfocó en el desarrollo de un proceso de identificación, análisis y evaluación; esto en consecuencia, mejora la eficiencia de la gestión de riesgos, ya que al medir es posible minimizar las pérdidas y maximizar las oportunidades.

RECOMENDACIONES

1. Es importante hacer el esfuerzo de identificar en la etapa inicial del proyecto, el impacto numérico y probabilidad de ocurrencia que pueden tener los riesgos más críticos de la situación analizada, así como el costo de las acciones de mitigación, todo lo cual va a ser de gran utilidad al momento de realizar la evaluación financiera de los impactos, oportunidades principales y acciones de mitigación que se planteen.
2. Valorar de forma preliminar los errores en las variables y supuestos que se están utilizando en la evaluación y análisis de riesgos, y con ello evitar el uso de pronósticos excesivamente conservadores y optimistas.
3. Aplicar la metodología desarrollada de análisis de riesgo e incertidumbre a otros proyectos de recobro mejorado.

BIBLIOGRAFÍA

BRAVO O, SANCHEZ M. "Gestión Integral de Riesgos". Bogotá, Colombia. 2007. Segunda Edición

REY SILVIA y VELASCO JOHNNIE. Aplicación software para la evaluación económica de proyectos de inyección de vapor. UIS 2007

OSPINA JOHAN ALBERTO. Evaluación Técnica de las pérdidas de calor en superficie en los pozos sometidos a inyección cíclica de vapor – Campo Teca. UIS 2004

MEDINA MIGUEL ANGEL. Análisis de sensibilidad de las variables presentes en un piloto vertical de inyección continua de vapor de cinco puntos utilizando simulación numérica de yacimientos. UIS 2005

ROA DEISY GONZÁLEZ. Análisis e interpretación de yacimientos sometidos a inyección cíclica de vapor mediante analogías. UIS 2005

BELTRAN JESUS ENRIQUE. Análisis e interpretación de yacimientos sometidos a inyección continua de vapor mediante analogías. UIS 2005

GOMEZ, GONZALO. Recuperación Mejorada de Hidrocarburos por Inyección Cíclica y Continua de Vapor (1989).

McNAMEE, David. Cuestionario sobre la administración del riesgo. 1997.

SAPAG, C. Preparación y Evaluación de Proyectos. Colombia, 1995.

PINDYCK, R. Investment under Uncertainty. Princeton University. 1994

FESTUS LEKAN FARIYIBI. Application of price uncertainty quantification models and their impacts on project evaluations. Texas A&M University. 2006

ADAMS, R. H. and KHAN, A.M.: "A New Tool To Evaluate the Feasibility of Petroleum Exploration Projects Using a Combination of Deterministic and Probabilistic Methods". SPE 105694. 2007.

HOLLAND, STEPHEN. "Modeling Peak Oil". IAEE. 2008

NEAL, Larry. "Use of the Decision Quality Process for Strategic Planning in the Duri Field, Indonesia ". SPE 28743. 1994

ZSOLT, P. "Application Monte Carlo Simulation in Risk Evaluation of E&P Projects". SPE 68578. 2001

SUSLICK, S.B. and SCHIOZER, D.J."Risk analysis applied to petroleum exploration and production: an overview". Journal of Petroleum Science and Engineering.2004

CORRE, B. THORE, P. FERAUDY, V. VINCENT, G."Integrated Uncertainty Assessment for Project Evaluation and Risk Analysis". SPE 65205. 2000

MUDFORT, Brett. "Stochastic Sensitivity Analysis or What Happened to my Tornado Plot". SPE 84235. 2003

JOSHI, SAMEER. And CASTANIER, M. Techno-Economic and Risk Evaluation of an EOR Project. SPE 39578. 1998

BEGG, S.H. and SMIT, N. Sensitivity of Project Economics to Uncertainty in Type and Parameters of Oil Price Models. SPE 110812. 2007

REVANA, K. and ERDOGAN, H.M. Optimization of Cyclic Steam Stimulation Under Uncertainty. SPE 107949. 2007

LICESIO, J. Rodríguez, Aragón. Simulación Método de Montecarlo. Estadística. 2008

GALLEGOS, JAVIER. Análisis de Riesgos en la evaluación de alternativas de inversión utilizando Crystall Ball. 2007

AGUIRRRE, TORRES KARLA. Riesgo e incertidumbre en la toma de decisiones. Prentice Hall. 2000

OLSEN, G.T. Price Uncertainty Quantification Models Advance Project economic Evaluations. SPE 94610. 2005

ANEXO A: CONCEPTOS ESTADÍSTICOS GENERALES

A.1. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

Muchas veces se dispone de una cantidad muy grande de datos que para poder analizarlos se hace necesario organizarlos. Tal análisis puede consistir donde se agrupan la mayor cantidad de los datos o como varían para poder detectar cualquier tendencia. La organización de los datos puede hacerse mediante gráficas, diagramas y tablas que sean de fácil entendimiento y manejo.

A continuación veremos las técnicas para construir estas formas de presentación.

A.1.1. Distribuciones de frecuencia Las distribuciones de frecuencia son una herramienta importante al momento de realizar un análisis detallado de los datos sabiendo que mediante estas, podemos definir con más claridad el comportamiento que están siguiendo los datos y operarlos posteriormente.

Es un método de clasificación y agrupamiento de datos estadísticos en clases o intervalos, de tal manera que se pueda establecer el número o porcentaje de cada clase y así manipularlos en grandes cantidades. El número o porcentaje de cada clase se le conoce como *frecuencia de clase*.

Los pasos para la construcción de una distribución de frecuencias son:

- **Paso 1: Determinar el número de clase:** Consiste en identificar los intervalos en los cuales vamos a dividir el conjunto de datos.

Demasiadas clases o muy pocas pueden no revelar la forma básica del conjunto de datos. Siempre es recomendable que el límite inferior de la primera clase sea un poco menor que el valor más pequeño del conjunto de datos. Además, que el límite superior de la última clase sea un poco mayor que el valor más grande del conjunto de datos. En general, para grandes cantidades de datos se requiere más clases que para pequeñas cantidades.

La fórmula que a continuación se nombra, permite calcular el número de clases.

$$\begin{aligned} \text{N}^\circ \text{ de intervalos} = k &= \sqrt{n} \text{ si } n \text{ no es muy grande} \\ &= 1 + 3.22 \text{ Log en otro caso} \end{aligned}$$

- **Paso 2:** *Determinar la amplitud de clase o intervalo de clase:* Se debe tomar el intervalo igual para todas las clases, sin embargo hay ocasiones en que se pueden tomar amplitudes de clase desiguales para evitar clases vacías o casi vacías. Del número de datos se busca el valor más alto (A) y el valor más bajo (B) y el intervalo se halla por medio de la fórmula

$$I = \frac{A - B}{K} \quad (1)$$

Donde K es el número de clases

- **Paso 3:** *Creación de las clases:* El límite superior de cada clase corresponde al intervalo siguiente. Para ser más estrictos, en términos matemáticos, cada clase sería un intervalo semiabierto a la derecha [)

- **Paso 4:** *Contar el número de elementos de cada clase:* Hay que recordar que el número de observaciones de cada clase se llama frecuencia de clase. Las frecuencias asociadas a cada clase se simbolizan F_i y las frecuencias relativas h_i
- *Punto medio de clase:* También conocida como marca de clase, se ubica a la mitad entre los límites inferiores de dos clases consecutivas. Se calcula sumando el límite inferior al límite superior de una clase y dividiendo esta suma por 2. La marca de clase se simboliza x_i donde i es el número de la clase correspondiente.

A.1.1.1. Propiedades de las distribuciones de Frecuencia Las distribuciones de frecuencia cumplen las siguientes propiedades:

- Las frecuencias de clase son enteros no negativos, es decir, $f_i \geq 0$.
- Las frecuencias relativas son números no negativos menores que 1, o sea $0 \leq h_i \leq 1$
- La suma de todas las frecuencias relativas es igual a 1, esto es,

$$\sum_{i=1}^n h_i = 1 \text{ donde } n \text{ es el número de datos.}$$

- La suma de todas las frecuencias es igual a la totalidad de los datos,

$$\text{es decir, } \sum_{i=1}^n f_i = n$$

A.1.1.2. Representaciones gráficas de una distribución de frecuencias

Generalmente resulta muy conveniente resaltar información contenida en una tabla de una distribución de frecuencias. Para tal fin se utilizan diagramas o gráficas.

Existen diagramas tales como el histograma, el polígono de frecuencias, el polígono de frecuencias acumuladas, entre otros, que representan de una manera adecuada la distribución de frecuencias. Al construir una gráfica en el plano cartesiano se acostumbra a ubicar a las clases en el eje de las abscisas (eje X) y las frecuencias en el eje de las ordenadas (eje y).

A.1.2. Histogramas Es uno de los diagramas que se utiliza con mayor frecuencia. Es una grafica hecha con rectángulos donde la base y la altura de cada uno son la clase y la frecuencia correspondiente, respectivamente. Cada rectángulo se coloca adyacente al inmediatamente anterior al el como se indica en la *Figura 1*.

Figura 1: Histograma.



Fuente: Los Autores.

A.2. MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL

Al tener un conjunto de datos es posible describirlos de dos maneras: la primera como se hizo en la explicación anterior de estadística descriptiva, por medio de una distribución de frecuencias, un histograma, entre otros.

La segunda forma, como se explicará a continuación, es describirlos mediante un único valor que sea representativo de todos los datos. A este valor se le conoce como medida de tendencia central. Se hace necesario saber que tan dispersos están todos los datos respecto a esta medida de tendencia central, y es por eso que además se estudian las medidas de dispersión.

A.2.1. Media Aritmética También se llama promedio aritmético. Si se suman cada uno de los valores de una variable x y se divide el resultado por el número de valores sumados, se obtiene la media aritmética o promedio. Cuando se trabaja con poblaciones se calcula la media poblacional y cuando se trabaja con muestras se calcula la media muestral.

A.2.1.1. Media Poblacional Se simboliza con la letra griega μ . Es la suma de todos los valores de la población, dividida entre el número total de dichos datos. Se calcula mediante la fórmula:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (2)$$

Donde:

μ : Es la media poblacional

n : Es el número total de datos de la población

X_i : Valor i de la población

A.2.1.2. Media Muestral Se simboliza por \bar{X} y es la suma de los valores de una muestra, dividida entre el número total de los mismos. Se calcula mediante la fórmula:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (3)$$

La media muestral, o cualquier otra medida basada en una muestra se conocen como dato estadístico.

A.2.2. Media Ponderada Es un caso especial de la media aritmética. Se aplica cuando hay observaciones con un mismo valor, lo cual puede ocurrir si los datos se han agrupado en una distribución de frecuencias. Se calcula mediante la fórmula:

$$X_p = \frac{\sum_{i=1}^n x_i f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (4)$$

Donde f_i es la frecuencia con que se repite el dato, también llamado peso, y n es número de datos.

A.2.3. Mediana Si en un conjunto de valores se observa que la tendencia de los datos está sesgada (inclinada) hacia los valores altos o hacia los bajos, es conveniente utilizar una medida más representativa llamada mediana. La mediana es el valor que corresponde al punto medio de los datos luego de ordenarlos de menor a mayor o viceversa de tal manera que el 50% de dichos datos son mayores que ella y el otro 50% son menores. Para cuando el número de datos es pequeño la mediana se puede calcular de dos formas:

- **Si el número de datos es impar.** Una vez que los datos estén organizados en orden creciente o decreciente, entonces la mediana estará a la mitad de los datos. Por ejemplo si se tienen los siguientes datos 1, 7, 25, 4, 7, 2, 8, 7, 1, 6, 6. Al organizarlos de mayor a menor, se tiene: 25, 8, 7, 7, 7, 6, 6, 4, 2, 1, 1.
- **Si el número de datos es par.** Después de organizar los datos, la mediana será la media de los dos datos centrales. Por ejemplo dados los datos 2, 3, 6, 5, 4, 9, 10, 11, 13, 16 y 18, Al organizarlos se tiene: 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 13, 16 y 18.

A.2.4. Moda Es el valor de la observación que aparece con más frecuencia. La moda es muy útil para describir datos de nivel nominal y ordinal, aunque se puede utilizar en cualquier nivel de datos.

A.3. MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL PARA DATOS AGRUPADOS

Cuando se tiene una gran cantidad de datos es muy tedioso hallarle sus medidas de tendencia central a menos que ellos se encuentren agrupados en una distribución de frecuencias.

A.3.1. Media Se considera que las observaciones en cada clase están representadas por la marca de clase (punto medio de cada clase), para su cálculo se emplea la fórmula:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n x_i f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (5)$$

Donde \bar{X} es la media aritmética, x_i es la marca de clase, f_i es la frecuencia de clase y n es el número total de clases.

A.3.2. Mediana Para datos agrupados no es posible encontrar la mediana exacta pues los datos no son identificables. Solo se puede hacer una estimación de ella.

Para estimar la mediana se utiliza la fórmula:

$$Med = L + \frac{\frac{n}{2} - F_i}{f_{clase}} I \quad (6)$$

Donde:

L Es el límite inferior de la clase que contiene la mediana.

n Es el número total de frecuencias.

f_{clase} Es la frecuencia de la clase que contiene la mediana.

F_i Es la frecuencia acumulada de las clases que están antes de la clase que contiene la mediana.

I Es la amplitud del intervalo o clase que contiene la mediana.

A.3.3. Moda La moda se aproxima al punto medio de la clase que contenga el mayor número de frecuencias de clase.

A.4. MEDIDAS DE DISPERSIÓN

La media, la mediana y la moda solo localizan en centro de los datos, pero no dicen nada acerca de cómo están dispuestos respecto a la medida de tendencia central. No es significativo saber cuál es la medida de tendencia

central de un conjunto de datos si no se sabe que tan apartados están los datos de esa medida. Es decir, tomar una decisión con solo saber una medida de tendencia central es arriesgado.

Por ejemplo si usted va a cruzar un río y ve un aviso que dice que la profundidad promedio es de 1.5 metros, ¿usted lo cruzaría con toda confianza?, muy seguramente si decide o no sería muy apresurado de su parte. Pero si en el aviso se anuncia que las profundidades del río a lo ancho no están muy alejadas del promedio, digamos que como máximo 0,2 metros, la decisión ahora de cruzar o no el río tiene mayor respaldo. En conclusión se necesitaría saber cómo varían las profundidades respecto al promedio, o sea, que tan dispersas están las medidas de las profundidades respecto al promedio.

A.4.1. Amplitud o intervalo de variación Es la diferencia entre el valor más grande y el valor más pequeño de un conjunto de datos. Por ejemplo, si los datos son 2, 7, 8, 9, 6, 3, 5 y 2, entonces la amplitud de variación es $Av = 9 - 2 = 7$.

A.4.2. Desviación Media Es el promedio de los valores absolutos de las desviaciones con respecto a la media aritmética. La desviación de un dato respecto a la media es la diferencia entre estos valores. Por ejemplo, si la media de un conjunto de datos es 5,3 y si de ese conjunto de datos se toma a 5, 8 entonces la desviación media es $|5,3 - 5,8| = 0,5$

$$Dm = \frac{\sum_{i=1}^n |X - xi|}{n} \quad (7)$$

Donde \bar{X} es la media, x_i es el dato i y n es el número de datos. El valor absoluto asegura que las diferencias entre la media y cada dato sea positiva.

A.4.3. Varianza Otra forma de evitar que las desviaciones respecto a la media aritmética sean negativas es elevarlas al cuadrado. La varianza es la media aritmética de las desviaciones cuadradas.

La varianza puede ser poblacional, que se simboliza por la letra sigma al cuadrado (σ^2); o puede ser muestral, simbolizada por la letra ese al cuadrado (s^2). Las fórmulas para cada caso son:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu - x_i)^2}{n} \quad (8)$$

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X - x_i)^2}{n - 1} \quad (9)$$

Donde μ es la media poblacional, \bar{X} es la media muestral, x_i es el dato i y n es el número total de datos de la muestra o población, según el caso.

A.4.4. Desviación estándar Es la raíz positiva de la varianza. También puede ser poblacional (σ) o muestral (s). Las fórmulas respectivas son:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\mu - x_i)^2}{n}} \quad (10)$$

$$s^2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X - x_i)^2}{n - 1}} \quad (11)$$

A.5. MEDIDAS DE DISPERSIÓN PARA DATOS AGRUPADOS

Es posible encontrar las medidas de dispersión para datos agrupados en una distribución de frecuencias.

A.5.1. Amplitud de variación Es la diferencia entre el límite inferior de la clase más baja y el límite superior de la clase más alta.

A.5.2. Desviación estándar La fórmula de la desviación estándar para datos agrupados en una distribución de frecuencias es:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_i x_i^2 - \frac{\sum_{i=1}^n f_i x_i}{\sum_{i=1}^n f_i}}{\sum_{i=1}^n f_i - 1}} \quad (12)$$

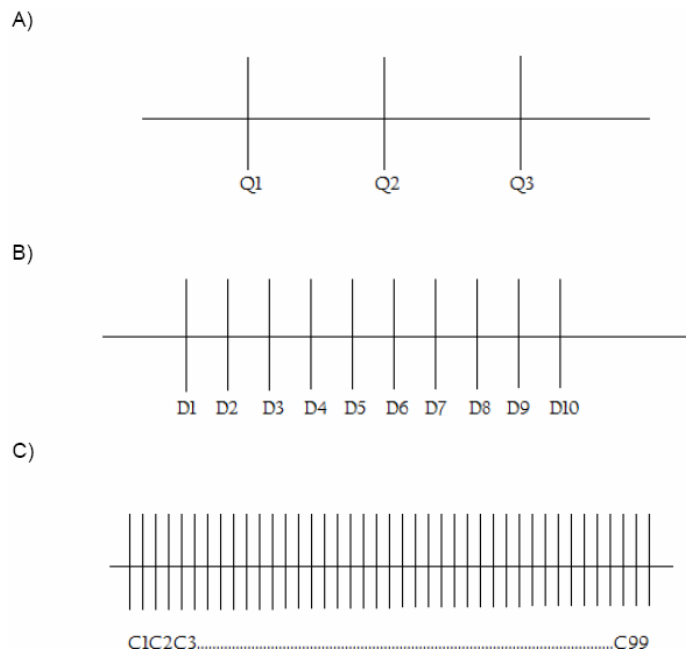
Donde s es la desviación estándar muestral, x_i es la marca de clase, f_i es la frecuencia de clase y n es el número de clases.

A.6. DECILES, CUARTILES Y CENTILES

Son medidas de dispersión que dividen los datos en partes iguales, así los deciles los dividen en 10 partes iguales, los cuartiles en cuatro partes iguales

y los centiles en 100 partes iguales. La *Figura 2* esquematiza la posición de estas medidas.

Figura 2: Medidas de dispersión.



Se podría pensar que los deciles, cuartiles y centiles no son medidas de dispersión porque solo dividen el conjunto de datos en partes iguales, como lo hace la mediana; pero la dispersión se nota cuando se habla que un porcentaje de los datos está por encima de una de estas medidas. Según el esquema de la *Figura 2* se puede ver por ejemplo que el cuartel Q1 separa el 25% del 75% restante de la derecha, el decil D7 separa el 70% del 30% restante de la derecha y el centil C33 separa el 33% de los datos del 67% restante de la derecha. Es decir, cada una de estas medidas separa un cierto porcentaje de datos a la derecha o a la izquierda. Las *Tablas 1, 2 y 3* muestran los porcentajes que separan cada una de estas medidas de dispersión.

Tabla 1: Porcentajes que separan los cuartiles de un conjunto de datos.

Cuartel	Porcentaje Menor	Porcentaje Mayor
Q1	25%	75%
Q2	50%	50%
Q3	75%	25%

Es de notar que el cuantil Q2 es equivalente a la mediana porque separa el 50% de los datos. También el decil D5 y en centil C50 son equivalentes a la mediana.

Tabla 2: Porcentajes que separan los deciles de un conjunto de datos

Decil	Porcentaje Menor	Porcentaje Mayor
D1	10%	90%
D2	20%	80%
D3	30%	70%
D4	40%	60%
D5	50%	50%
D6	60%	40%
D7	70%	30%
D8	80%	20%
D9	90%	10%

Tabla 3: Porcentajes que separan los centiles de un conjunto de datos

Centil	Porcentaje Menor	Porcentaje Mayor
C1	1%	99%
C2	2%	98%
C3	3%	97%
C4	4%	96%
C5	5%	95%
C6	6%	94%
C7	7%	93%
...
C98	98%	2%
C99	99%	1%

Para ubicar un cuartil, un decil, o un centil se utiliza la fórmula:

$$L = (n + 1) \frac{P}{100} \quad (13)$$

Donde n es el total de observaciones y P puede ser el cuartil, decil o centil que se quiere ubicar y toma el valor de porcentaje menor que la medida separa. Por ejemplo si se quiere situar el tercer cuartil, entonces $P = 75$ ya que este cuartil separa el 75% de los datos del 25% que queda mayor (Ver **Tabla 1**).

De una manera más práctica si utilizamos la notación “el percentil P_k ” entonces “ K ” es el porcentaje de datos acumulados.

A.7. PROBABILIDADES

En temas anteriores se trato sobre la estadística descriptiva, es decir, como organizar los datos de una muestra o población y que tanto estaban tan dispersos respecto a una medida de tendencia central.

La tendencia se fija ahora en la estadística inferencial. Esta se ocupa del estudio de la posibilidad de que algo ocurra en el futuro. Esta rama de la estadística se encarga de obtener conclusiones de una población a partir de una muestra. Es claro que la toma de decisiones implica una cierta incertidumbre, es decir no se sabe si la decisión es la correcta; pero si se puede saber la probabilidad que resulte confiable tal decisión. Es por ello que la teoría de las probabilidades constituye la base fundamental para la estadística inferencial.

La teoría de la probabilidad es una teoría muy intrincada y desarrollada para describir los sucesos aleatorios. La palabra aleatorio proviene del vocablo alea, el cual significa suerte o azar. Un fenómeno aleatorio es aquel cuyo resultado está fuera de control y que depende del azar. Que tanta incertidumbre se tiene respecto a un fenómeno constituye la probabilidad de ocurrencia de un evento.

A.7.1. Evento Un evento está relacionado con el azar, o sea, su ocurrencia depende exclusivamente de este, es por esto que algunas veces se le conoce como evento aleatorio.

A.7.2. Definición de Probabilidad de un evento La probabilidad es un concepto abstracto que se usa para describir el grado de incertidumbre de un evento. La probabilidad es un número entre cero y uno, inclusive que describe la probabilidad relativa de que ocurra un evento. Si se denota la

probabilidad de un evento con la letra P, entonces $0 \leq P \leq 1$. Si la probabilidad de un evento es 0, entonces el evento es imposible, si es 1, entonces el evento es seguro.

Una probabilidad se puede expresar como una fracción decimal tal como 0.23, 0.40, o 0.134, como un número racional tal como $\frac{2}{3}$, $\frac{1}{5}$ o $\frac{3}{10}$ o en porcentaje así como 20%, 85%, o 28,4%.

A.7.3. Puntos de vista de la probabilidad El análisis de las probabilidades se puede hacer desde distintos puntos de vista: desde el punto de vista objetivo, que a su vez puede ser clásico o empírico; y desde el punto subjetivo.

A.7.3.1. Probabilidad Objetiva De manera intuitiva, se acostumbra a considerar la probabilidad de un evento como un número. Este número puede ser calculado de acuerdo con la proporción de casos favorables o de veces que ocurrió un evento en un tiempo determinado.

A.7.3.2. Probabilidad Clásica Se basa en la consideración de que todos los resultados de un experimento son igualmente posibles. La fórmula para el cálculo de esta probabilidad es:

$$P(E) = \frac{N^{\circ} \text{ de resultados a favor del evento}}{N^{\circ} \text{ de resultados posibles}}$$

Donde P (E) es la probabilidad de que ocurra el evento E.

A.7.3.3. Probabilidad empírica Se basa en las frecuencias relativas de eventos que han sucedido en un tiempo pasado determinado. Se calcula

observando el número de veces en que el evento ocurrió en un tiempo determinado.

La fórmula para calcular este tipo de probabilidad es:

$P(E) = \frac{N^{\circ} \text{ de veces que ocurrió el evento en el pasado}}{N^{\circ} \text{ total de observaciones}}$.

A.7.3.4. Probabilidad subjetiva Estas probabilidades se pueden interpretar como evaluaciones personales o subjetivas. Se asignan de acuerdo a cualquier información que se disponga con base en suposiciones razonadas, intuición u otras subjetividades. Por todo lo anterior no existe una fórmula para calcular la probabilidad subjetiva, pues es un valor que se asigna de acuerdo a lo que se piensa, podría ser.

A.7.4. Distribuciones de probabilidad Una distribución de probabilidad hace referencia a toda una gama de probabilidad de los eventos de un experimento y muestra que tan probable es un evento futuro, relacionado con dicho experimento. Se puede concebir como una distribución teórica de frecuencias, es decir, una distribución que describe como se espera que varíen las probabilidades para el experimento dado. Las distribuciones de frecuencias son modelos de gran utilidad, pues ayudan mucho en las frecuencias y en la toma de decisiones en condiciones de incertidumbre.

Una distribución de probabilidad es un modelo matemático que organiza los eventos posibles de un experimento y que les asocia su probabilidad correspondiente.

A.8. VARIABLE ALEATORIA

La variable aleatoria es una función que asocia un número real, perfectamente definido, a cada resultado posible de un experimento. Las probabilidades son funciones de las variables aleatorias. Por esta razón es que a las distribuciones de probabilidad se les conoce como funciones de densidad de probabilidad (fdp). Un fdp asocia a cada valor de una variable aleatoria una probabilidad.

A.9. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD DISCRETA

Como se mencionó anteriormente, la distribución de probabilidad discreta nace de una variable aleatoria discreta. Existen varios tipos especiales de esta clase de distribución, y entre las más conocidas están: la distribución binomial, la distribución geométrica, la distribución de Poisson.

A.9.1. Función de distribución acumulativa Hay muchos problemas donde es importante conocer la probabilidad que el valor de una variable aleatoria sea menor o igual a un número real a . Se puede escribir, por consiguiente, la probabilidad de que la variable aleatoria X tome valores menores o iguales que a como la función F tal que $F(X) = P(X \leq a)$, a esta función se le conoce como función de distribución acumulativa o simplemente función de distribución de la variable aleatoria X . Matemáticamente esta función se define por:

Si X es una variable aleatoria discreta, $F(X) = P(X \leq a) = \sum_{i \leq a}^n P(X)$, es decir la

función de distribución acumulativa es la suma de todas las probabilidades que están por debajo de la probabilidad de que la variable aleatoria tome el valor de a .

A.9.2. Media, varianza y desviación estándar de una distribución de probabilidad discreta Al igual que en las distribuciones de frecuencia, en las distribuciones de probabilidad se pueden calcular la media, como una medida de tendencia central; la desviación estándar y la varianza como una medida de dispersión.

La media: Es un valor típico que representa a la distribución de probabilidad. Se simboliza por μ y viene dada por:

$$\mu = \sum_x XP(X) \quad (14)$$

Donde $P(X)$ es la probabilidad de que la variable aleatoria X tome un valor entre x real. Algunas veces se habla del valor esperado de una variable aleatoria $E(X)$ en vez de la media de la distribución. Los significados son idénticos.

La varianza: Como se ha visto anteriormente la varianza es una medida que muestra la dispersión de los datos. En el caso de las distribuciones de probabilidad la varianza σ^2 se calcula mediante la fórmula.

$$\sigma^2 = \sum (X - \mu)^2 P(X) \quad (15)$$

La desviación estándar: Es la raíz cuadrada de la varianza, se simboliza por σ y viene dada por la fórmula:

$$\sigma = \sqrt{\sum_x (X - \mu)^2 P(X)} \quad (16)$$

A.9.4. Tipos de Distribuciones de Probabilidad Discreta

A continuación se dará una definición breve de las distribuciones de probabilidad discreta más usadas.

A.9.4.1. Distribución Binomial Es una distribución de probabilidad discreta del número de éxitos en una secuencia de n experimentos independientes, cada uno de los cuales tiene probabilidad θ de ocurrir. (La distribución de Bernoulli es una distribución binomial con $n=1$). Su función de masa de probabilidad está dada por:

$$b(x; n, \theta) = \frac{n!}{x!(n-x)!} \theta^x (1-\theta)^{n-x} \quad (17)$$

Para $x = 0, 1, 2, \dots, n$ siendo $\frac{n!}{x!(n-x)!}$ las combinaciones de n en x (n elementos tomados de x en x).

A.9.4.2. Distribución de Poisson Expresa la probabilidad de un número de eventos ocurriendo en un tiempo fijo si estos ocurren con una tasa media conocida, y son independientes del tiempo desde el último evento.

La distribución fue descubierta por Simeón – Denis Poisson (1781 – 1840) que publicó, junto con su teoría de probabilidad, en 1838 en su trabajo "investigación sobre la probabilidad de los juicios en materias criminales y civiles". El trabajo estaba enfocado en ciertas variables aleatorias N que cuentan, entre otras cosas, un número de ocurrencias discretas que tiene lugar durante un intervalo de tiempo de duración determinada. Si el número esperado de ocurrencias en este intervalo es λ , entonces la probabilidad de

que haya exactamente K ocurrencias (siendo K un entero no negativo, $K = 0, 1, 2, \dots$) es igual a:

$$F(k; \lambda) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!} \quad (18)$$

Donde:

e es la base del logaritmo natural ($e = 2.71828\dots$),

$k!$ es el factorial de k

k es el número de ocurrencias de un evento,

λ es un número real positivo, equivalente al número esperado de ocurrencias durante un intervalo dado.

La distribución Poisson es también llamada Poissoniana, análogamente al término gaussiana para una distribución de Gauss o distribución normal.

A.10. DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD CONTINUA.

Una distribución de probabilidad continua está sujeta a una variable aleatoria continua. Las distribuciones de probabilidad continua más conocidas están: la distribución de probabilidad normal, la distribución de probabilidad log – normal, la distribución triangular, la distribución gama, la distribución Ji – cuadrado, entre otras.

Una función f definida para un conjunto de valores se le conoce como función de densidad de probabilidad para una variable continua X si $P(a \leq X \leq b) =$

$\int_a^b f(x)dx$ para cualquier constante a y b . es decir que para calcular la

probabilidad de que el valor de la variable continua este entre $x = a$ y $x = b$ se

debe encontrar el área debajo de la curva definida mediante la función de densidad de probabilidad entre esos valores.

La probabilidad de que una variable aleatoria continua tome un valor de $x = a$

es $P(a) = \int_a^b f(x)dx = 0$, es decir, cuando se trabaja con variables aleatorias

continuas, no tiene sentido preguntar por la probabilidad de un valor particular si no por la probabilidad en un intervalo de valores. Por lo tanto, para el caso continuo tiene mayor importancia hablar de la distribución de probabilidad acumulada y no de la distribución de probabilidades en sí.

Para que una función f sea considerada una función de densidad de probabilidad, se deben cumplir las dos condiciones siguientes:

- f debe ser positiva o cero para cualquier valor de la variable aleatoria continua, es decir, $f(x) \geq 0$ para todo $x \in (-\infty, \infty)$. Esto significa que la gráfica de la función de densidad de probabilidad debe estar por encima del eje horizontal (eje de las abscisas).
- El área debajo de la gráfica de la función f entre menos infinito y el

infinito, debe ser igual a 1. Esto es $\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1$

A.10.1. Función de distribución acumulativa Para hablar de las distribuciones de probabilidad acumulada para el caso continuo se hace necesario definir la función de distribución acumulativa o función de distribución.

La función de distribución de una variable continua X dada por $F(X) = P(X \leq a) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)dt$, es decir la función de distribución acumulativa es el área bajo la curva de la función de densidad de probabilidad f entre menos infinito y el valor a .

A.10.2. Media, varianza y desviación estándar de una distribución de probabilidades continúa En las distribuciones de probabilidad continuas también se puede calcular la media, la varianza y la desviación estándar.

La media o el valor esperado: La media o el valor esperado se calcula por la fórmula:

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx \quad (19)$$

La varianza: σ^2 se calcula mediante la fórmula

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x)dx \quad (20)$$

La desviación estándar: Es la raíz cuadrada de la varianza, se simboliza por σ y viene dada por la fórmula

$$\sigma = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x)dx} \quad (21)$$

A.10.3. Tipos de distribución de probabilidad continúa A continuación se explicara brevemente las distribuciones de probabilidad continua más

conocidas y usadas. Vale la pena aclarar que al momento de la aplicación del método de montearlo, se debe trabajar con una distribución de probabilidad de este tipo.

A.10.3.1. La distribución Normal Debería llamarse distribución acumulativa normal, pues como se ha dicho, en las distribuciones continuas tiene mayor sentido hablar de las distribuciones acumulativas. Para mayor simplicidad se le llaman distribución normal y a la función de densidad de probabilidad se le llamara curva normal. La variable aleatoria continua con una distribución normal es una de las distribuciones más importantes en el campo de la estadística.

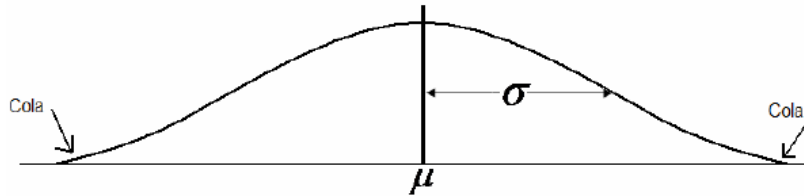
Las características de la distribución normal son:

- La curva normal, *Figura 3*, es en forma de campana y presenta un pico en centro de la distribución. La media, la mediana y la moda de la distribución son iguales y están localizadas en el centro.
- La distribución normal es simétrica respecto a su media, por lo tanto el área de la curva que está a la derecha de la media es igual a la que está a la izquierda.
- La curva normal decrece uniformemente en ambas direcciones a partir del valor central. Es asintótica respecto al eje horizontal. Las terminaciones a ambos lados de la media se le llaman colas.

La función de densidad de probabilidad (curva normal) viene dado por

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (22)$$

Figura 3: Curva de una distribución normal.



Para $-\infty \leq x \leq \infty$

Para este tipo de distribución la media, o esperanza o valor esperado viene dada por:

$$\mu = E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x f_x(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[-e^{-\frac{x^2}{2}} \right] \quad (23)$$

La varianza se define como (teniendo en cuenta que el valor esperado= 0):

$$E(X^2) = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f_x dx = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = 1 \quad (24)$$

$$Var(X) = E(X^2) - [E(X)]^2 = 1 \quad (25)$$

Dependiendo de los valores que tome la media μ y la desviación estándar σ la grafica será más alargada o achatada, pero en cualquier caso tendrá las mismas condiciones de simetría.

El área total bajo la curva es igual a 1. El área debajo de la curva comprendida entre $\mu - \sigma$ y $\mu + \sigma$ es aproximadamente igual a 0.68 del área

total; entre $\mu - 2\sigma$ y $\mu + 2\sigma$ es aproximadamente igual a 0.95 del área total. Las Figuras 4 y 5, ilustran las áreas descritas.

Figura 4: Porcentaje de área comprendida entre $\mu - \sigma$ y $\mu + \sigma$.

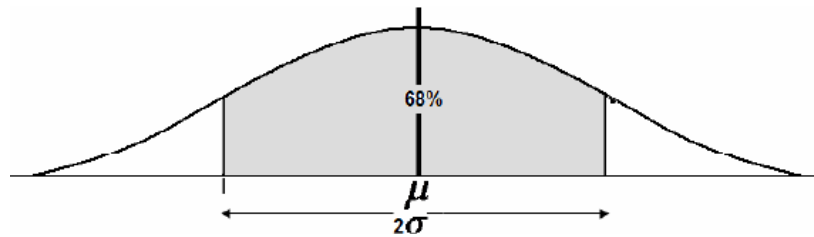
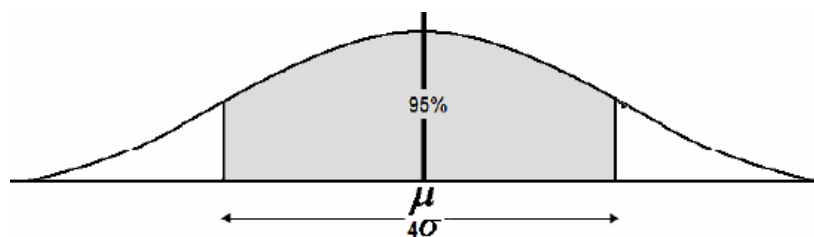


Figura 5: Porcentaje de área comprendida entre $\mu - 2\sigma$ y $\mu + 2\sigma$.



Los únicos parámetros necesarios para dibujar un gráfico de la distribución normal son μ y σ . Con estos dos parámetros se puede situar la campana (en el punto correspondiente a la media) y cuál es su ancho (determinado por la desviación estándar).

A.10.3.2. Distribución Log Normal La distribución Log Normal, *Figura 6*, es una distribución de probabilidad de cualquier variable aleatoria con su logaritmo normalmente distribuido (la base de una función logarítmica no es importante ya que, $\log_a X$ está distribuido normalmente si y solo si $\log_b X$ está distribuida normalmente). Si X es una variable aleatoria con una distribución normal, entonces $\exp(X)$ tiene una distribución log – normal.

Una variable puede ser modelada como log – normal si puede ser considerada como un producto multiplicativo de muchos pequeños factores independientes. Un ejemplo típico es un retorno a largo plazo de una inversión: puede considerarse como un producto de dos retornos diarios. La distribución log – normal tiende a la función densidad de probabilidades:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_1 x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (26)$$

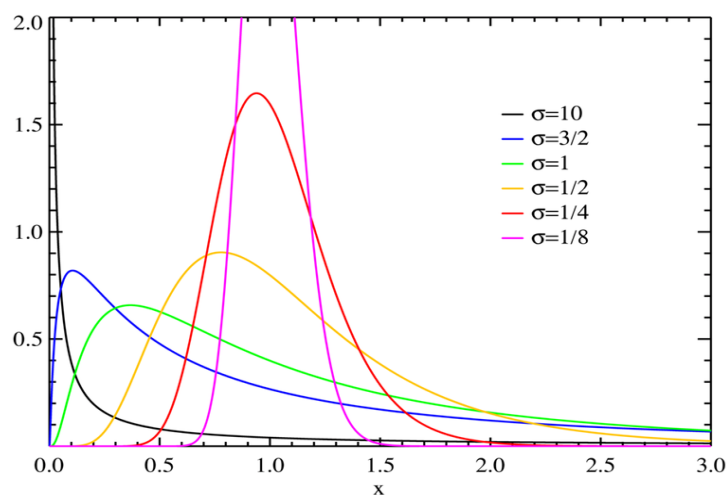
Para $x > 0$, donde μ y σ son la media y la desviación estándar del logaritmo de la variable. El valor esperado es:

$$E(X) = e^{\mu + \sigma^2 / 2} \quad (27)$$

Y la varianza,

$$\text{var}(X) = (e^{\sigma^2} - 1)e^{2\mu + \sigma^2} \quad (28)$$

Figura 6: Curva de una Distribución Log Normal



Fuente: http://gl.wikipedia.org/wiki/image:Lognormal_distribution_PDF.png

A.10.3.3. Distribución Triangular Este tipo de distribución se emplea básicamente en aquellos problemas en los cuales se conocen muy pocos datos o ningún dato. La distribución triangular es útil como una aproximación inicial en situaciones para las que no se dispone de datos confiables.

Esta distribución tiene 3 parámetros, a (límite inferior de la variable), m (la moda) y b (el límite superior de la variable).

Sea X una variable aleatoria valuada en $(a, b) \subset \nabla$, se dice que se distribuye según una distribución triangular si su función de densidad responde a la siguiente expresión:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(m-a)} & \text{Si } a < x \leq m \end{cases} \quad (29)$$

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-m)} & \text{Si } m \leq x < b \end{cases} \quad (30)$$

$$f(x) = 0 \text{ en otro caso} \quad (31)$$

A.10.3.4. Distribución Gamma

Es una distribución de probabilidad continua con dos parámetros k y λ cuya función de densidad para valores $x > 0$ es:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \frac{(\lambda x)^{k-1}}{\Gamma(k)} \quad (32)$$

Aquí e es el número e y Γ es la función gamma dada por:

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt \quad (32)$$

El valor esperado y la varianza de una variable aleatoria X de distribución gamma son:

$$E[X] = k / \lambda \quad (33)$$

$$V(X) = k / \lambda^2 \quad (34)$$

A.10.3.5. Distribución Chi Cuadrado La distribución ji-cuadrado, también denominada ji-cuadrado de Pearson, es una distribución de probabilidad continua con un parámetro k que representa los grados de libertad de la variable aleatoria:

$$X = Z_1^2 + \dots + Z_k^2 \quad (35)$$

Donde Z_i son variables de distribución normal, de media cero y varianza uno. Esta distribución se expresa habitualmente $cX \sim X^2_k$ donde el subíndice k de X^2_k , es el número de sumandos, se denomina grados de libertad de la distribución.

Se suele usar la denominada prueba ji-cuadrado como test de independencia y como test de bondad de ajuste.

La función de densidad ji-cuadrado es:

$$f_k(x) = \frac{1/2)^{k/2}}{\Gamma(k/2)} x^{k/2-1} e^{-x/2} \quad (36)$$

Donde $x \geq 0$ y $f_k(x) = 0$ para $x \leq 0$

Γ es la función gamma.

La función de distribución es:

$$Fk(x) = \frac{\gamma(k/2, x/2)}{\Gamma(k/2)} \quad (37)$$

Donde $\lambda(k, z)$ es la función gamma incompleta.

El valor esperado y la varianza de una variable aleatoria X con distribución chi-cuadrada son:

$$\begin{aligned} E[X] &= k \\ V[X] &= 2k \end{aligned} \quad (38)$$