UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Dirección General de los Estudios de Postgrado

Gerencia de Proyectos

ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS APLICADO A PROYECTOS DE PERFORACIÓN DE POZOS

Alexander Castaño

C.I.: 12.064.444

Profesor Asesor:

Luis Enrique Palacios

Trabajo Especial de Grado presentado
como requisito para optar al título de
ESPECIALISTA EN GERENCIA DE PROYECTOS

Caracas, Junio 2001

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 4

2. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO 6

3. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA 7

4. MARCO TEÓRICO 9

4.1 FUNDAMENTOS DE GERENCIA DE PROYECTOS 9

4.1.1 Definiciones básicas en proyectos 9

4.1.2 La vida del proyecto 10

4.1.3 La gerencia de proyectos 12

4.2 GERENCIA DEL RIESGO EN PROYECTOS 15

4.2.1 Introducción 15

4.2.2 Procesos en la gerencia del riesgo 16

4.2.3 Identificación de riesgos según las distintas áreas de la gerencia de proyectos 19

4.2.4 Cuantificación del riesgo 21

4.2.5 Desarrollo de planes de respuesta 23

4.3 ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS 25

4.3.1 Introducción 25

4.3.2 ¿Qué es el Análisis Cuantitativo de Riesgos (QRA)? 26

4.3.3 Componentes clave del Análisis Cuantitativo de Riesgos 27

4.3.4 Usos del Análisis Cuantitativo de Riesgos 29

4.3.5 Beneficios y limitaciones del Análisis Cuantitativo de Riesgos 30

4.3.6 Herramientas del Análisis Cuantitativo de Riesgos 31

4.3.7 Simulación 32

5. DESARROLLO DEL TRABAJO 45

5.1 CONCEPTOS BÁSICOS EN PERFORACIÓN DE POZOS PETROLEROS 45

5.1.1 Explotación de yacimientos 45

5.1.2 Perforación de pozos 48

5.1.3 Procesos operacionales de la perforación de pozos 50

5.1.4 Perforación y rehabilitación de pozos en PDVSA 51

5.2 MANEJO DEL RIESGO EN PROYECTOS DE PERFORACIÓN DE POZOS 53

5.2.1 Introducción 53

5.2.2 Antecedentes 55

5.2.3 Un nuevo enfoque 56

5.3 APLICACIÓN DEL ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS EN OPERACIONES DE PERFORACIÓN 63

5.3.1 Descripción de la metodología a utilizar 63

5.3.2 Análisis Cuantitativo de Riesgos usando el programa Crystal Ball 64

5.3.3 Aplicación en proyectos de perforación de pozos. 66

5.3.4 Análisis de sensibilidad 82

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 88

7. BIBLIOGRAFÍA 92

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las empresas operadoras de Exploración y Producción (E&P) invierten alrededor de 20 mil millones de dólares por año en tareas de perforación de pozos. Lamentablemente no todo ese dinero se utiliza en forma adecuada, ya que alrededor de 15% se asigna a pérdidas. Estas pérdidas comprenden las pérdidas de material, como equipos de perforación y fluidos, y pérdidas de continuidad de los procesos de perforación, las cuales se originan durante la búsqueda e implantación de soluciones para resolver los problemas de perforación. Si se pudieran evitar estos problemas, se reducirían los costos de exploración y desarrollo, y los miles de millones de dólares que se pierden hoy en día se podrían destinar a seguir mejorando los procesos.

El manejo del riesgo durante la perforación de pozos significa no dejar que los problemas menores se transformen en problemas mayores. Si se identifican los riesgos y se anticipan los eventos indeseables, se pueden reducir las sorpresas. Debe recordarse que la mayor parte del tiempo dedicado a la perforación, y la mayor parte de los costos, no ocurren mientras se atraviesa el yacimiento sino en llegar hasta el mismo.

El éxito de la perforación depende, entonces, del desarrollo de un plan coherente, actualizado en forma permanente a la luz de los nuevos datos obtenidos y de mantener bien informado al personal involucrado. Dicho plan debe incluir los procedimientos a seguir bajo circunstancias normales y los métodos adecuados para tratar los problemas más serios que se puedan producir con mayor frecuencia.

En este trabajo se desarrollará, enmarcado dentro de los procedimientos corporativos para la Gerencia de Proyectos de Ingeniería y Construcción establecidos por PDVSA, una metodología que permita cuantificar los factores de riesgo y determinar las probabilidades de ocurrencia de eventos imprevistos en

proyectos de perforación de pozos, como una herramienta que facilite la toma de decisiones (técnica y gerencial) durante las etapas de planificación y de ejecución de tales proyectos.

El método desarrollado considera las dificultades que se presentan en la determinación de las variables de riesgo para los proyectos de perforación de pozos y utiliza las técnicas disponibles en el Análisis Cuantitativo de Riesgos (QRA por sus siglas en inglés) tales como la simulación de Monte Carlo para correlacionar la información existente en las bases de datos operacionales. Los resultados de este proceso constituyen los elementos base para realizar el análisis de riesgo, como elemento clave durante el proceso de planificación y así poder cuantificar el impacto que los factores de riesgo pudieran tener durante la ejecución del proyecto.

2. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

Este trabajo surge como respuesta a la necesidad de contar con una herramienta metodológica para la toma de decisiones, de fácil comprensión y uso por parte del personal técnico y gerencial, que permita a las Gerencias de Perforación y Subsuelo de PDVSA Exploración, Producción y Mejoramiento de Crudo (EPM) incorporar el análisis cuantitativo de riesgos como parte integral de los procesos de planificación y ejecución de los proyectos de perforación de pozos.

Desde el punto profesional este trabajo forma parte de las actividades que se realizan como parte de los proyectos ejecutados por la Gerencia Corporativa de Perforación y Rehabilitación de Pozos de PDVSA, la cual tiene como objetivo el velar por todos los aspectos técnicos, operacionales y de negocios relacionados con el proceso de construcción y mantenimiento de pozos a escala nacional. Esta gerencia corporativa constituye un centro de excelencia para la realización de la actividad de perforación y rehabilitación de pozos de desarrollo y para la evaluación de prospectos (pozos exploratorios) de PDVSA. Esta organización además consolida las áreas de planificación y control de gestión, diseño, procesos operacionales, fluidos de perforación y rehabilitación, cementación y procesos de completación e intervenciones a pozos, cada una de las cuales está liderada por personal técnico altamente calificado que conforma grupos de afinidad técnica o Comunidades de Conocimiento, las cuales tienen inherencia a nivel corporativo.

3. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

El objetivo de este trabajo es mostrar la aplicación de la metodología de Análisis Cuantitativo de Riesgos (QRA) para determinar el impacto que puede tener en TIEMPO y COSTO la ocurrencia de eventos imprevistos durante la perforación de pozos. De ocurrir tales eventos, se podrán activar los planes de contingencia adecuados para evitar que problemas menores se transformen en problemas mayores. Las herramientas analíticas para el manejo del riesgo permiten predecir el comportamiento del pozo con suficiente antelación, para que los ingenieros de perforación en campo puedan tomar las decisiones operativas técnicamente adecuadas con tranquilidad, lo cual llevará a optimizar el rendimiento de la perforación.

Las variables de riesgo son cuantificables en términos de sus efectos sobre el tiempo y costo de las actividades definidas dentro de un proyecto. La metodología del Análisis Cuantitativo de Riesgos (QRA) permite identificar las variables susceptibles de afectar el desempeño del proyecto, establecer su comportamiento probabilístico y calcular mediante una técnica de simulación, como la simulación de Monte Carlo, los valores esperados de tiempo y costo del proyecto, así como sus correspondientes niveles de certidumbre.

El análisis supone una serie de pasos a seguir, los cuales se señalan a continuación:

1. Definición de un modelo determinístico del cálculo del tiempo y costo del proyecto, como punto de partida de la simulación.
2. Definición de todas las variables de riesgo del proyecto y su comportamiento probabilístico.
3. Aplicación de la técnica de simulación de Monte Carlo para modificar el modelo determinístico de manera que permita accesar todas las combinaciones de valores definidos para las distintas variables de riesgo.

4. Proyección de la curva de distribución del tiempo y costo del proyecto y su nivel de certidumbre.

Mediante la simulación de Monte Carlo es posible generar diferentes escenarios, ya que utiliza un proceso de muestreo al azar para cuantificar el valor esperado del proyecto. Realiza un número determinado de iteraciones dentro del rango especificado para las variables y de acuerdo a las distribuciones seleccionadas. Mediante esta aproximación se obtiene una distribución de valores para las proyecciones resultantes, a diferencia de los métodos determinísticos, los cuales generan un solo resultado. Específicamente, la simulación de Monte Carlo permite obtener distribuciones de los indicadores de tiempo y costo del proyecto, así como también sus respectivos niveles de certidumbre, con los cuales se identifican las probabilidades de éxito de la inversión.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 FUNDAMENTOS DE GERENCIA DE PROYECTOS

4.1.1 Definiciones básicas en proyectos

Un proyecto es un trabajo que realiza una organización con el objetivo de dirigirse hacia una situación deseada. Se define como un conjunto de actividades orientadas a un fin común, que tienen un comienzo y fin determinados. Entre sus características fundamentales se debe mencionar que es un trabajo temporal y que su resultado es un producto o servicio único.

- Es una labor temporal, ya que todo proyecto tiene un tiempo de finalización previamente definido. La temporalidad se refiere al esfuerzo puntual realizado por un grupo de personas que se unen por un tiempo para lograr el objetivo deseado, ya que usualmente el producto o servicio derivado de su trabajo es indefinido en el tiempo.
- El resultado de un proyecto suele ser único e irrepetible, ya que implica hacer algo que no estaba hecho anteriormente.

Por su condición de proyecto, el trabajo tiene una serie de características muy particulares. Es una labor de mucha *incertidumbre*, lo que hace necesaria mucha planificación y control sobre lo que se está realizando. Suele ser una labor compleja y multidisciplinaria ya que requiere de la participación de un conjunto de recursos y personas con distintas habilidades. Por ser un trabajo como todos los que realiza una organización, contempla las principales características de una operación continua, ello implica recursos limitados y procedimientos preestablecidos.

Una característica que describe muy bien a los proyectos es su carácter evolutivo, ya que tienen un ciclo de vida, donde se producen secuencialmente las

transformaciones de un conjunto de materias primas a productos y servicios comercializables con mayor valor agregado.

4.1.2 La vida del proyecto

Ciclo de vida de la idea

Todo proyecto es una pequeña parte de la vida de una idea, que cumple un ciclo donde es concebida, se formula, se evalúa, se aprueba, se ejecuta, se hace realidad, comienza a funcionar comercialmente en forma de productos y servicios en un mercado, crece, llega a su madurez y finalmente a su muerte.

Un proyecto puede surgir en uno o varios de los pasos en la vida de la idea, como una forma de producir un cambio deseado en la situación que se vive en el momento. La Figura 3.1 permite ver estas etapas en el tiempo.

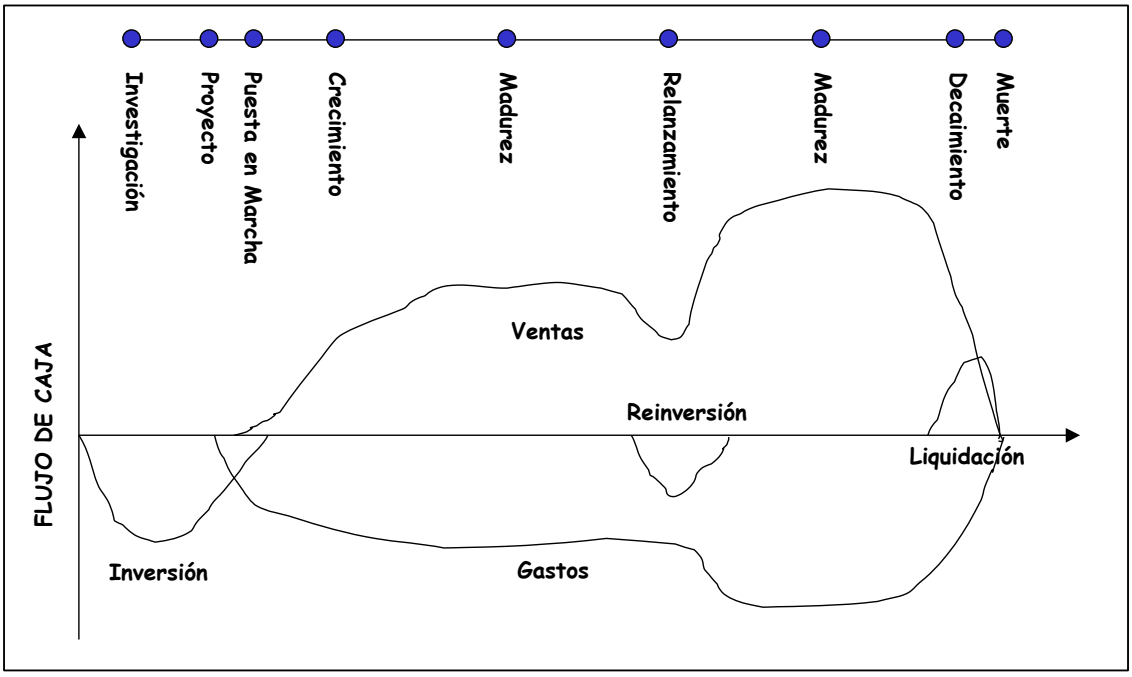


Figura 4.1: Ciclo de vida de una idea.

Fases de un proyecto

En el transcurso de la vida de una idea se puede identificar claramente un periodo delimitado como el proyecto, definido como actividades únicas y temporales, que consumen recursos y que se ejecutan para obtener los productos deseados.

De una forma general, todo proyecto puede pasar por una serie de fases en su ciclo de vida particular, comenzando por el inicio, luego una serie de actividades que se pueden agrupar en unas fases intermedias y finalmente el cierre. La Figura 3.2 muestra gráficamente la curva del nivel de esfuerzo en el tiempo.

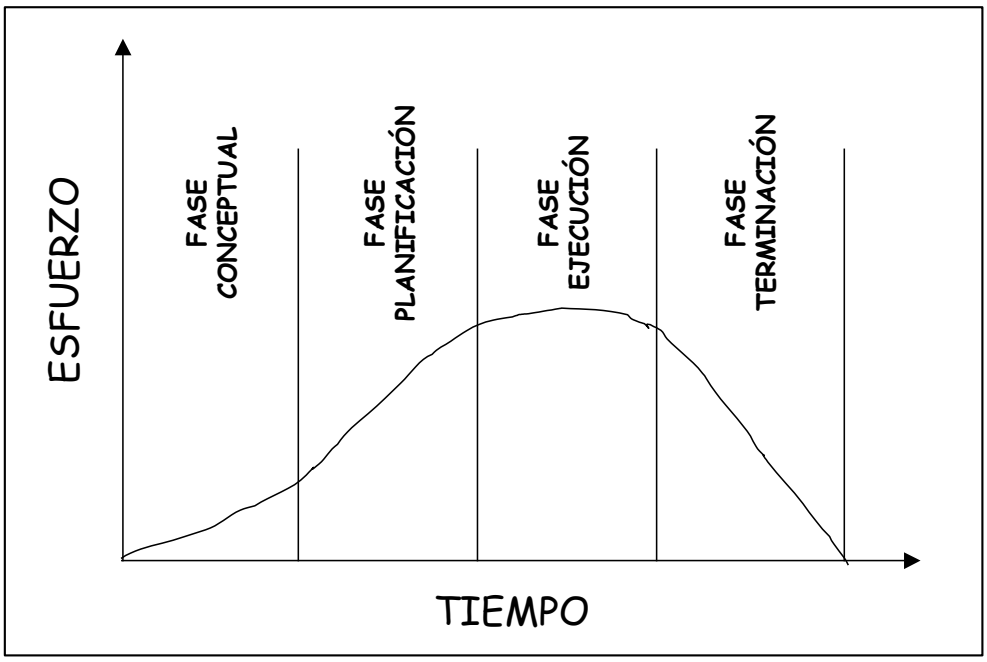


Figura 4.2: Ciclo de vida de un proyecto.

Se considera que hay un cambio de fase cuando hay cambios significativos en el tipo de personal que participa en el trabajo, en el tipo de actividades que se ejecutan y cuando se genera un producto de salida que se transforma en la entrada de la siguiente fase. Las fases en cuestión son:

- **Fase Conceptual**

  Es la etapa donde nace la idea, se formula el proyecto al analizar los puntos clave, se toma la decisión favorable de iniciar las actividades del proyecto, se establecen las metas, se hacen los principales nombramientos y asignaciones de recursos. El producto final de esta fase es un documento donde se explica qué se va a hacer con la aprobación de la alta gerencia.

- **Fase Organizacional**

  Contempla el periodo de planificar e idear la mejor forma de hacer realidad lo planteado en la fase conceptual. Se diseña la organización y constituye el equipo de proyecto, se buscan los recursos y se hace el plan maestro y detallado de actividades. El producto final de esta fase es el *plan integral* del proyecto.

- **Fase de Ejecución**

  Es la etapa donde se ejecutan los trabajos principales del proyecto, y por lo tanto, se suelen consumir la mayor cantidad de recursos. El producto final de esta fase es una unidad productiva (o servicio) sustancialmente hecha.

- **Fase de Terminación**

  Es el periodo donde se terminan las actividades, se cierran los contratos, se transfieren los recursos y compromisos a otras organizaciones, se hace la puesta en marcha, etc. El producto final de esta fase es un cierre administrativo del proyecto.

4.1.3 La gerencia de proyectos

Metodología y herramientas de la gerencia de proyectos

La gerencia de proyectos (Project Management) es la aplicación sistemática de una serie de conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas para alcanzar o exceder los requerimientos de los involucrados (stakeholders) de un proyecto.

En la Figura 4.3 se muestra la metodología de la gerencia de proyectos; puede observarse que implica dirigir un proyecto a través de su ciclo de vida, lo que involucra balancear una serie de demandas competitivas entre sí:

- Identificar los requerimientos y las expectativas en torno al proyecto.
- Satisfacer las necesidades de la organización, de los clientes y consumidores.
- Determinar el alcance adecuado para el proyecto, sobre la base de la situación y los objetivos.
- Completar el proyecto en el tiempo establecido y que termine con un desempeño aceptable, usando los recursos asignados.

Figura 4.3: Metodología de la gerencia de proyectos.

Para lograr esto, la gerencia de proyectos hace el uso más eficiente de los recursos disponibles, controlando las principales variables de éxito mediante las siguientes herramientas básicas:

- **Estructura Desagregada de Trabajo (WBS – Work Breakdown Structure)**
  Es la herramienta base para crear y manejar todas las demás. Consiste en la preparación de una lista detallada de todas las actividades que deben realizarse para completar el proyecto. Es el instrumento que permite manejar el ***alcance*** del trabajo.

- **Cronograma**

  Implica la asignación de fechas en las que se efectuarán las actividades, de forma de poder manejar los ***tiempos*** en el proyecto.

- **Presupuesto**

  Es el principal instrumento para manejar los ***costos*** del proyecto, delimitando el flujo de dinero durante la vida del proyecto, en función de las actividades que deben realizarse.

- **Especificaciones**

  Para el manejo de la ***calidad*** durante el proyecto se deben delimitar, con indicadores medibles, las características técnicas que debe cumplir el trabajo realizado, de forma de satisfacer los intereses de todos los involucrados en el proyecto.

- **Matriz de responsabilidades**

  Es el instrumento base para la distribución del trabajo que debe ejecutarse en el proyecto, determinando las responsabilidades específicas de todo el ***personal*** que participa.

- **Plan de respuestas**

  Es la forma de responder anticipadamente a los potenciales peligros que atentan contra el éxito del proyecto. Es la herramienta fundamental del manejo de ***riesgos***.

4.2 GERENCIA DEL RIESGO EN PROYECTOS

4.2.1 Introducción

La gente está generalmente más confortable cuando opera bajo certidumbre. El mundo parece más seguro y se puede planificar con plena confianza. Sin embargo, el ambiente en el cual se desempeña una organización (tanto interno como externo) está envuelto en incertidumbres. Cuando la incertidumbre es grande y no hay vías conocidas para tomarla en cuenta, la toma de decisiones se hace más difícil. Por otra parte, cuando los costos unitarios son relativamente pequeños, cuando no se producen mayores inconvenientes como resultado de una falla o cuando la probabilidad de un defecto o una falla es extremadamente pequeña, comúnmente la incertidumbre es ignorada.

El análisis de todos los factores que pueden influir en los resultados de un proyecto, mediante la maximización de los eventos positivos y minimización de los eventos adversos, se conoce como **manejar** o **gerenciar el riesgo**. Este proceso debe comenzar desde la misma fase conceptual, identificando los riesgos mayores y los factores de éxito, de forma que la decisión de ejecutar el proyecto esté respaldada por una evaluación de todo lo que puede ir mal. El manejo del riesgo es algo que se debe visualizar más allá del proyecto mismo, ya que puede haber un impacto en futuras actividades de la organización.

Un proyecto donde no se maneja eficientemente el riesgo tiene el peligro de convertirse en un fracaso, dado que lo emprendido no es terminado por culpa de la mala concepción de las variables del tiempo, costo y calidad del mismo. Una de las claves del éxito en gerencia de proyectos es la capacidad del equipo de *adelantarse* a la aparición de los problemas de forma de estar preparados cuando estos ocurran. La gerencia del riesgo es una manera sistemática de hacer esta labor.

El riesgo es una medida del nivel de certidumbre que se tiene en un *continuum; e*n un extremo se tiene la absoluta seguridad de lo que va a suceder y en el otro existe una ausencia total de información y por tanto incapacidad de predicción. Según esto, el riesgo es una medida de la falta de certidumbre, basada en la indisponibilidad de información adecuada. La Figura 4.4 muestra este concepto.

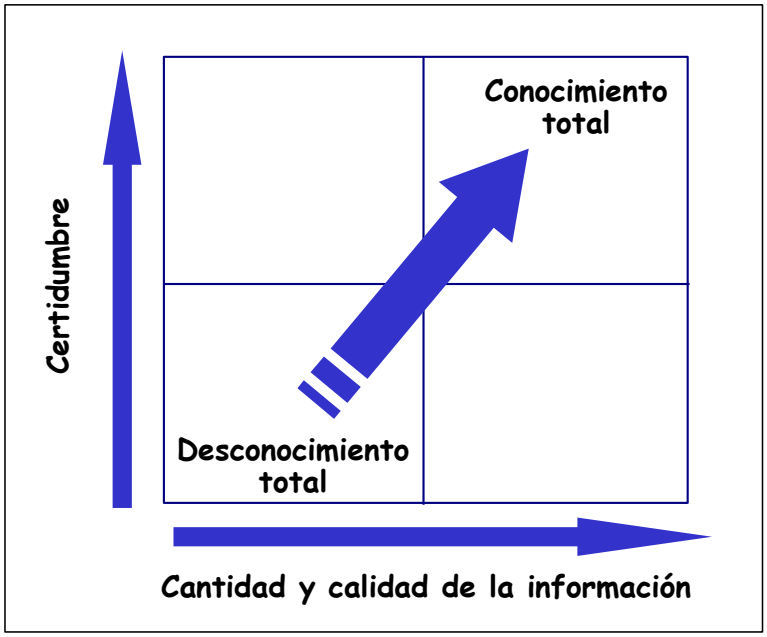


Figura 4.4: Continuum de certeza.

4.2.2 Procesos en la gerencia del riesgo

La política de gerencia del riesgo en proyectos debe estar basada en el principio de que la responsabilidad debe ser de quien representa la fuente del riesgo. Para lograr esto hay que manejar efectivamente los siguientes procesos:

Identificación del riesgo

Consiste en hacer una secuencia de evaluación de los posibles riesgos involucrados, utilizando para ello listas de chequeo, diagramas de causa efecto y buscando la opinión de los expertos. Para ello es de mucha importancia la

aplicación del pensamiento divergente, de forma que puedan aflorar todas las posibilidades que pueden ir mal en el proyecto. El enfoque sistémico de la gerencia de proyectos permite visualizar este proceso en la Figura 4.5.

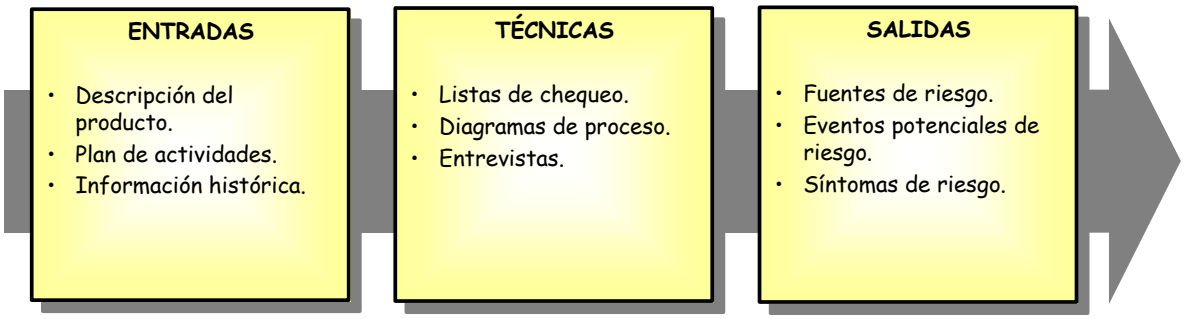


Figura 4.5: Proceso de identificación del riesgo.

Un concepto fundamental en el proceso de identificación es el problema de la percepción del grupo de personas que están evaluando el proyecto, ya que los riesgos que no han sido identificados no implica que no existen. Para entender mejor esto se puede aplicar el símil del iceberg, el cual sólo muestra sobre la superficie una porción muy pequeña de su tamaño total, pero por debajo se mantiene una gran cantidad de peligros desconocidos. La Figura 4.6 muestra gráficamente este símil, con los fundamentos del manejo de riesgo.

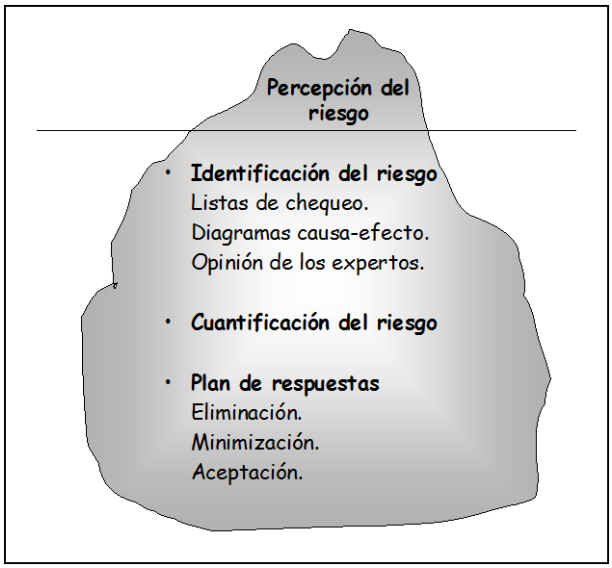


Figura 4.6: Percepción del riesgo.

Cuantificación del riesgo

Implica estimar la probabilidad de ocurrencia de los eventos de riesgo identificados y modelar matemáticamente su impacto, generando resultados esperados que permitan analizar la posibilidad que tiene el proyecto de incumplir con el plan. La Figura 4.7 presenta las entradas, herramientas y salidas de este proceso.

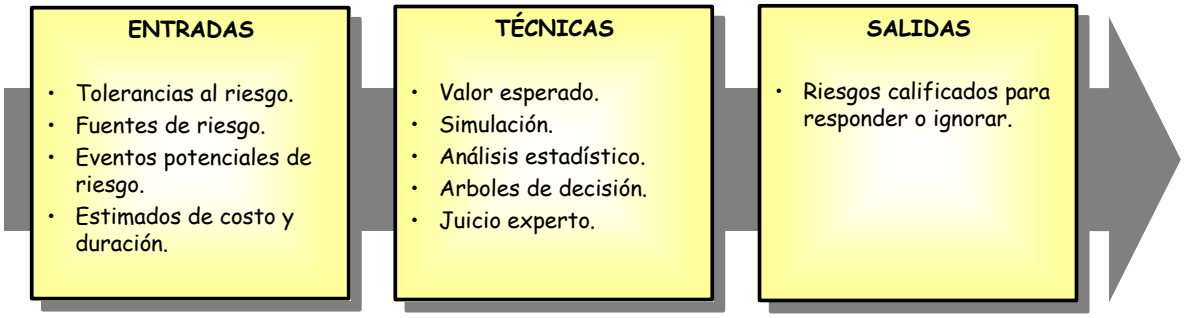


Figura 4.7: Proceso de cuantificación del riesgo.

La cuantificación permite jerarquizar aquellos riesgos de mayor costo esperado, para de esa forma calificarlos como de alto, moderado o bajo riesgo. La Figura 4.8 muestra el resultado final del proceso.

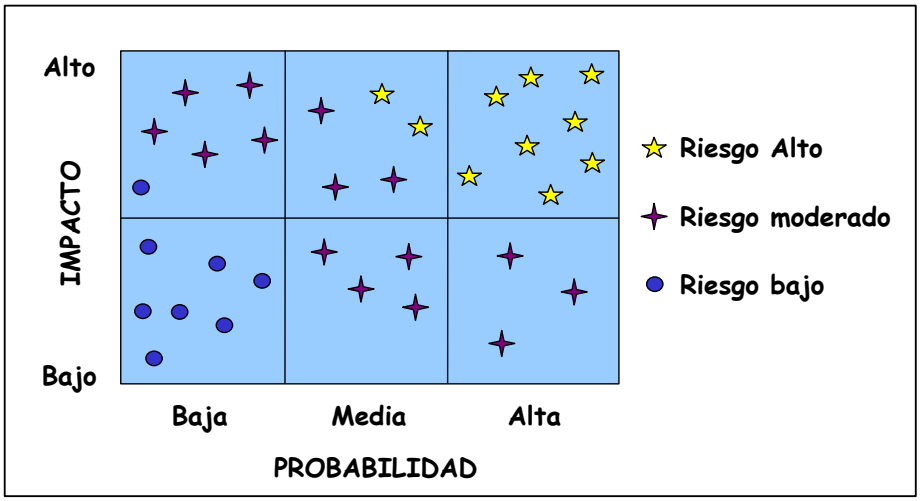


Figura 4.8: Calificación de alto, moderado y bajo riesgo.

Plan de respuestas

Es el desarrollo de una metodología de acción y prevención de los posibles riesgos del proyecto, a partir de la cuantificación. Para ello, el proceso tiene como insumos las posibles oportunidades a perseguir o ignorar y peligros para responder o aceptar. Como técnicas de tratamiento del proceso, la gerencia de proyectos tiene el análisis de opciones, la planificación de contingencias, el aseguramiento y la subcontratación.

Los resultados del proceso de desarrollo de respuestas a los riesgos así cuantificados, implican el desarrollo de un plan de contingencias, las reservas operativas, los acuerdos contractuales y en general, el plan para el manejo de los riesgos en el proyecto. Cada persona y organización tiene un enfoque particular con respecto al tema de las respuestas al riesgo que dependen del nivel de tolerancia y aversión al riesgo. En la Figura 4.9 se muestra este proceso con mayor detalle.

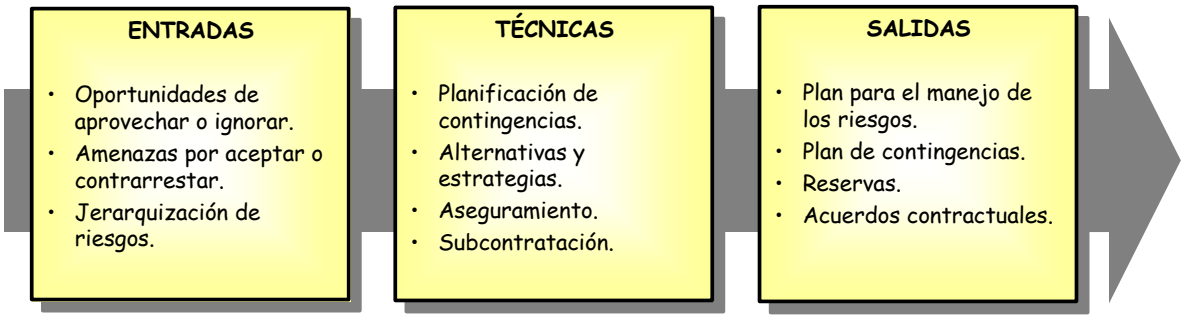


Figura 4.9: Proceso de desarrollo de respuestas al riesgo.

4.2.3 Identificación de riesgos según las distintas áreas de la gerencia de proyectos

Un buen proceso de identificación de riesgos involucra a cada una de las áreas más importantes que se manejan en la gerencia de proyectos, pudiendo determinarse posibles eventos riesgosos con sus condicionantes. A continuación se evalúan los más comunes en cada área:

- **Alcance**

  El principal riesgo en materia del alcance es que durante la ejecución del proyecto haya que incluir más actividades de las originalmente previstas o que haya que cambiar alguna propiedad en el producto. Esto suele estar condicionado a una planificación inadecuada o fuera de tiempo, una pobre definición de la estructura desagregada de trabajo, inconsistencias o falta de claridad en los requerimientos de calidad o un control deficiente del alcance durante la implantación.

- **Tiempo**

  Los eventos indeseados suelen ser retrasos producidos por huelgas, falta de materiales, clima adverso o repetición del trabajo por no cumplir los mínimos exigidos. Los principales condicionantes están relacionados con errores en la estimación del tiempo requerido o de los recursos disponibles, una pobre negociación con las unidades funcionales para lograr la asignación del personal necesario, cambios en la cantidad de trabajo sin la adecuada pertinencia del tiempo y la liberación temprana de productos de la competencia.

- **Costo**

  Los principales eventos de riesgo implican cambios por la imposibilidad de predecir los precios o por el impacto de accidentes y robos en el proyecto. Para ello, los condicionantes incluyen los errores en la estimación, falta de incorporación de contingencias adecuadas, poca investigación de problemas predecibles, baja productividad, pobre mantenimiento o seguridad en la compra y en especial, las deficiencias en el control de los costos y el manejo de la tesorería.

- **Calidad**

  El principal evento de riesgo definido para la calidad tiene que ver con el fracaso del desempeño final del proyecto o el impacto ambiental que puede generar. Esto está condicionado a la pobre actitud que se tenga hacia la calidad, la falta de estándares en el diseño, métodos, procesos, etc., y un programa equivocado para el aseguramiento de la calidad.

- **Procura**

  Lo más común que puede suceder es la insolvencia de contratistas y los problemas en la solución de reclamos. Estos riesgos vienen condicionados por la existencia de cláusulas y condiciones de contratación no aplicables o ejecutables, inestabilidad financiera del contratista, retrasos en el pago, asignaciones contractuales equivocadas del riesgo o simplemente relaciones adversas.

4.2.4 Cuantificación del riesgo

El cálculo del impacto de un riesgo en un proyecto es una labor complicada y controversial, por la incertidumbre y lo inexacto de las ciencias del comportamiento humano y empresarial. En este sentido se puede hablar de cuantificar para calificar el riesgo. Cuando se analiza el riesgo en un proyecto se puede hablar de la *probabilidad* que ocurra un evento indeseado y del impacto que este evento podría traer si se hace realidad.

Medir la probabilidad de ocurrencia de un evento de riesgo identificado previamente puede hacerse de forma subjetiva, si se transforma una expresión verbal a un valor cuantificable, tal como se muestra en la Figura 4.10.

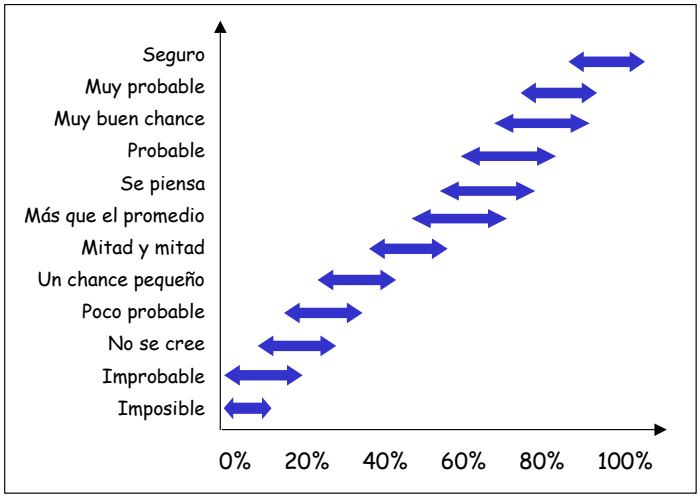


Figura 4.10: Cuantificación de la expresión verbal de riesgo.

Cuando se habla de planificación de riesgos en proyectos, lo que se hace es estudiar cómo un hecho puede afectar al proyecto y cómo adelantarse antes de que ocurra. En otros ámbitos, se analiza el riesgo desde su punto de vista financiero, asociado a la posibilidad de que una empresa no pueda cumplir con las acreencias acordadas en su financiamiento.

No es tarea fácil determinar cómo puede incidir en una organización el endeudamiento, la estabilidad del mercado, la percepción de la competencia, etc. Sin embargo, lo que para algunos de los interesados es positivo, puede ser negativo para otros y las técnicas matemáticas pueden dar un sentido falso de confiabilidad.

Un evento de riesgo puede causar efectos múltiples en el plan del proyecto como retrasos del cronograma, sobrecostos, desempeño deficiente, etc. El análisis de riesgos en un proyecto suele llevar asociado la creación de la contingencia. Para determinar cuál debe ser el monto ideal a ser asignado por este motivo se puede hacer una evaluación del costo esperado de los principales eventos de riesgo del proyecto, lo cual implica multiplicar el impacto financiero si se materializa el riesgo, por su probabilidad de ocurrencia. La sumatoria global para todo el proyecto da una idea del monto a reservar para imprevistos.

La Tabla 4.1 muestra un ejemplo de ello, una vez identificados los principales riesgos por medio de una tormenta de ideas. Luego se intenta determinar una probabilidad de ocurrencia y la cuantificación del impacto.

Tabla 4.1: Ejemplo de cuantificación del riesgo.

Evento de Riesgo	Probabilidad	Impacto	Costo esperado	Hito asociado
Incumplimiento del contratista.	50%	100	50	Fecha de entrega
Disponibilidad de materiales.	20%	200	40	Arranque de construcción
Retraso por Lluvias	30%	50	15	
SUB-TOTAL			**105**	
Incluyendo un imprevisto de 20%			126	

En el caso del impacto, el cálculo puede hacerse en función del tiempo promedio de inactividad por el costo de cada hora perdida y el costo de oportunidad del día perdido. En el caso del incumplimiento de contratista, se puede estimar el tiempo usando como base su promedio de retrasos.

Un punto que debe considerarse al hacerse el análisis es asociar el riesgo con la ocurrencia de un hito importante en el proyecto, de manera que se pueda determinar en qué momento ese riesgo se va a evaluar, y así poder descartarlo o activar el plan de respuesta.

4.2.5 Desarrollo de planes de respuesta

Ante los riesgos de un proyecto, hay que distinguir la respuesta en función del tratamiento que se le da al propio riesgo como tal o en función de cómo ese riesgo afectará a la empresa. Analizando los riesgos identificados y cuantificados, la gerencia del proyecto puede adoptar alguna de las siguientes opciones:

- **Eliminación**

  Consiste en atacar directamente la fuente del riesgo, quitando la causa que lo genera, con el objeto de evitar su aparición. Este tipo de respuestas es en general el más efectivo, ya que es el único que implica una respuesta activa

premeditada, sin embargo, sólo puede usarse en ciertas situaciones que tengan solución. Es la respuesta que se busca cuando se enfrentan hechos de alto riesgo, como los que tienen que ver con la puesta en peligro de la seguridad personal.

- **Minimizacion**

  Implica trabajar para disminuir la probabilidad de ocurrencia del evento de riesgo o en hacer que su impacto tenga pocas consecuencias cuando éste se produce. Es una respuesta más realista porque enfrenta a la mayoría de las situaciones de riesgo que pueden aparecer en la vida del proyecto. Es común observar esta estrategia en riesgos medios y altos que impliquen grandes pérdidas económicas.

- **Aceptación**

  Es la estrategia en la que simplemente no se actúa directamente sobre el riesgo, sino en la forma como la empresa lo afrontará, tal cual como se encuentra. Es la respuesta empleada para riesgos de muy baja calificación o en situaciones donde es muy poco lo que se puede influir, como es el caso de eventos naturales.

En la próxima sección se explicarán con detalle los fundamentos teóricos de una herramienta muy poderosa para la gerencia del riesgo en proyectos, la cual se denomina Análisis Cuantitativo de Riesgos y contempla todos y cada uno de los procesos desarrollados en esta sección.

4.3 ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS

4.3.1 Introducción

La ***incertidumbre*** existe cuando la probabilidad de ocurrencia de algunos eventos es parcial o totalmente desconocida. Algunas de esas incertidumbres pudieran ser: necesidades del mercado, decretos, leyes, cambios tecnológicos, cambios de precio, inflación, huelgas, estabilidad política, etc. Por otro lado, el ***riesgo*** es el grado en que esas incertidumbres pueden impactar los resultados. Así, el riesgo existe cuando el valor de una variable independiente puede estar dentro de un conjunto o rango, es decir, el riesgo es la variabilidad que puede tener una variable por no haber ocurrido.

Muchos riesgos e incertidumbres son cuantificables en términos de sus efectos en costos y tiempo. Tales riesgos pueden ser analizados a través de una evaluación económica por la medición de sus efectos sobre los indicadores económicos usados para evaluar la factibilidad del proyecto.

Como se explicó en la sección anterior, el primer paso para gerenciar el riesgo es entender que existe, razón por la cual debe ser interiorizado como un rasgo cultural de la organización. El problema comienza cuando se entiende que el caso base de la evaluación económica es sólo un estimado y que las variables envueltas tienen cierta incertidumbre o probabilidad de tomar ciertos valores, pero no puede asegurarse cuáles serán sus valores en el futuro.

La mayoría de los proyectos de la industria del petróleo y gas se desarrollan normalmente en un entorno de alto riesgo; con los grandes cambios tecnológicos que experimenta esta industria los riesgos se hacen aún mayores. Los proyectos exitosos no dan por sentado la ausencia de problemas durante las distintas etapas de su ciclo de vida, sino que tratan de pronosticar y manejar los riesgos de modo que cuando esos problemas aparezcan puedan ser resueltos. El ***Análisis***

Cuantitativo de Riesgos (QRA -Quantitative Risk Analysis- por sus siglas en inglés) ofrece métodos muy poderosos y precisos para gerenciar los distintos riesgos de un proyecto y producir una visión realista de su incertidumbre.

4.3.2 ¿Qué es el Análisis Cuantitativo de Riesgos (QRA)?

El Análisis Cuantitativo de Riesgos es una herramienta para la toma de decisiones que puede ayudar en la selección de las alternativas de solución a problemas técnicos, económicos y de seguridad en los proyectos. Esta técnica puede definirse como un enfoque formal y sistemático para la identificación de eventos potencialmente riesgosos y la estimación de la probabilidad de ocurrencia de hechos y consecuencias negativas a las personas, el medio ambiente y los activos de la organización.

El proceso del Análisis Cuantitativo de Riesgos trata de dar respuesta a las siguientes preguntas, tal como se muestra en la Figura 4.11.

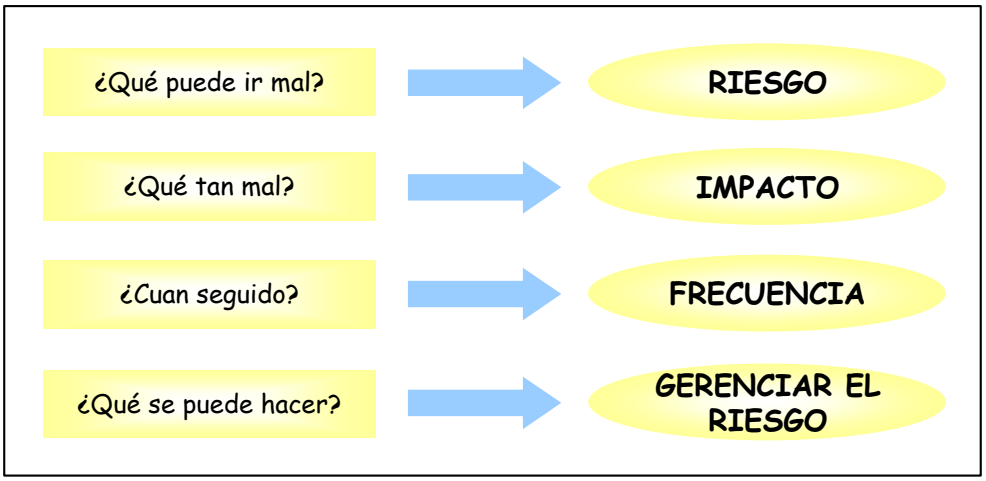


Figura 4.11: Proceso de Análisis Cuantitativo de Riesgos.

En esta sección es importante destacar que **este trabajo se concentrará en los riesgos de tipo operacional que pueden presentarse durante la ejecución de proyectos de perforación de pozos**.

El Análisis Cuantitativo de Riesgos aplicado en proyectos de perforación de pozos puede ser usado como herramienta para identificar los impactos en TIEMPO y COSTO que los riesgos pueden tener sobre este tipo de proyectos.

El Análisis Cuantitativo de Riesgos es una de las técnicas más sofisticadas disponibles para pronosticar los riesgos de eventos no deseados y para establecer los medios adecuados para minimizarlos. Sin embargo, a pesar de utilizar métodos estadísticos, es una técnica que depende en gran medida del juicio experto de quien toma las decisiones y sus resultados pueden tener un alto grado de incertidumbre. También es importante destacar que no debe ser la única técnica utilizada en la toma de decisiones relacionada con actividades de alto riesgo, sino que la aplicación de otras técnicas basadas en la experiencia y juicio experto puede ser de mucha utilidad.

4.3.3 Componentes clave del Análisis Cuantitativo de Riesgos

En la Figura 4.12 se presenta la estructura típica de un Análisis Cuantitativo de Riesgos.

La primera etapa es la **definición del sistema**, la cual establece los riesgos que serán analizados en un proyecto dado. El alcance y los objetivos definen los límites del estudio, identificando cuáles actividades están incluidas y cuáles no; así como las fases del proyecto a analizar.

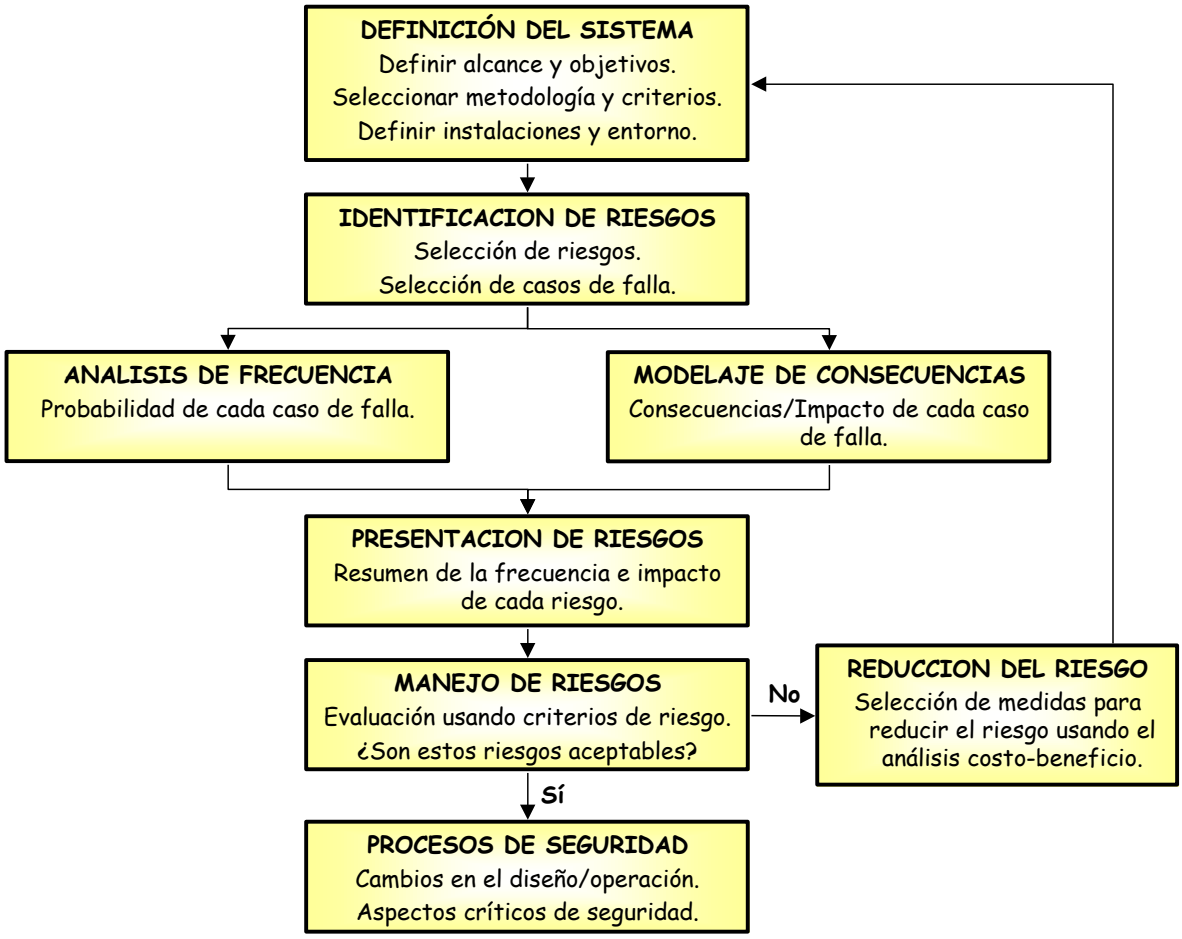


Figura 4.12: Flujograma del Análisis Cuantitativo de Riesgos.

La etapa de la **identificación de los riesgos** consiste en una revisión cualitativa de los posibles eventos que pueden ocurrir basado en la experiencia previa o el juicio experto cuando sea necesario. Una vez que los riesgos han sido identificados, el **análisis de frecuencia** estima su probabilidad de ocurrencia; mientras que al mismo tiempo, la **identificación de las consecuencias** evalúa los efectos resultantes e impacto en caso de que los eventos de riesgo ocurran. Cuando la probabilidad y los impactos de cada evento han sido estimados, se pueden combinar para generar medidas globales de riesgo.

Hasta este punto, el proceso es básicamente de carácter técnico; el siguiente paso es introducir **criterios de riesgo**, que son referencias para establecer si los riesgos son aceptables o para hacer algún otro juicio con

respecto a su importancia. Esta etapa comienza a introducir aspectos cualitativos en la aceptación del riesgo y la toma de decisiones; se está hablando entonces del proceso de **manejo del riesgo**.

Para poder aceptar los riesgos se deben introducir **medidas de reducción** de tales riesgos, cuyos beneficios pueden evaluarse repitiendo el análisis desde un comienzo, introduciendo así un ciclo en el proceso. El costo económico de tales medidas puede compararse con sus beneficios utilizando un **análisis costo-beneficio**.

4.3.4 Usos del Análisis Cuantitativo de Riesgos

Los objetivos principales que se buscan al realizar un Análisis Cuantitativo de Riesgos de tipo económico son, entre otros, los siguientes:

- Estimación de los niveles de riesgo y su impacto sobre el proyecto, lo cual determina cuáles son los riesgos que deben ser reducidos.
- Identificación de las principales fuentes de riesgo.
- Identificación de los niveles de contingencia que deben aplicarse para evitar impactos mayores en el tiempo y costo del proyecto.
- Comparación de opciones de diseño.
- Evaluación de medidas para reducir los riesgos; un Análisis Cuantitativo de Riesgos puede estar asociado a un análisis costo-beneficio para determinar las mejores formas de mitigar esos riesgos.
- Información a la gerencia sobre la exposición al riesgo del proyecto.

Vistos como un todo, estos posibles usos del Análisis Cuantitativo de Riesgos definen una estructura lógica para el monitoreo de los riesgos en proyectos, estableciendo una guía para la toma de decisiones sobre aspectos técnicos, económicos y de seguridad.

4.3.5 Beneficios y limitaciones del Análisis Cuantitativo de Riesgos

Beneficios

La principal fortaleza del Análisis Cuantitativo de Riesgos es que se trata de una de las pocas técnicas existentes que es capaz de dar una guía a los diseñadores y operadores de un proceso sobre la mejor manera de minimizar los riesgos de eventos no deseados. El Análisis Cuantitativo de Riesgos combina la experiencia previa con los juicios expertos para anticipar estos eventos antes de que ocurran.

En la actualidad el Análisis Cuantitativo de Riesgos se aplica a aquellos procesos donde existe gran cantidad de experiencia operacional, de modo que se puede desarrollar una base de datos confiable que soporte los estudios posteriores (por ejemplo, las operaciones de perforación de pozos en tierra). Sin embargo, los aspectos de seguridad en estos procesos puede manejarse con relativa facilidad a partir de la experiencia previa. El valor agregado del Análisis Cuantitativo de Riesgos es mayor en aquellas aplicaciones de tecnologías nuevas donde existe poca experiencia operacional, ya que permite identificar aquellos eventos no deseados que nunca han ocurrido anteriormente sobre la base de la experiencia en otras áreas.

El Análisis Cuantitativo de Riesgos es particularmente útil en la gerencia de proyectos cuando incluye un análisis costo-beneficio de las posibles medidas que pueden aplicarse para reducir los riesgos o cuando presenta distintas alternativas de diseño.

Limitaciones

El Análisis Cuantitativo de Riesgos es una técnica relativamente nueva por lo que, en general, no existen enfoques y metodologías comunes, así como disponibilidad de datos, lo que resulta en variaciones muy amplias dentro de los estudios realizados.

Debido a que se trata de un estudio cuantitativo, el análisis parece ser objetivo; pero en realidad depende en gran medida del juicio experto. Estos juicios pueden ser explícitos en aquellas áreas donde no existe disponibilidad de datos, pero también pueden haber muchos juicios implícitos en el análisis y uso de datos conocidos, que a menudo no son tomados en cuenta.

Es importante destacar que el Análisis Cuantitativo de Riesgos no debe ser la única herramienta metodológica utilizada en la toma de decisiones, sino que la aplicación de otras técnicas basadas en la experiencia y juicio experto deben ser tomadas en cuentas al momento de tomar una decisión definitiva.

4.3.6 Herramientas del Análisis Cuantitativo de Riesgos

Las tres técnicas más utilizadas en el Análisis Cuantitativo de Riesgos son las siguientes:

- **Simulación de Monte Carlo**
  Esta técnica genera la distribución de probabilidades de los posibles resultados de un evento, analizando el modelo de interés muchas veces a través de la selección aleatoria de los valores que definen las variables de dicho modelo.
- **Análisis por Arbol de Fallas**
  Esta técnica se refiere a la identificación y análisis de las condiciones y factores que pueden causar o contribuir a la ocurrencia de eventos no deseados, que han sido identificados con anterioridad; especialmente aquellos eventos que afectan el desempeño del sistema, economía, seguridad, etc.
- **Análisis por Arbol de Eventos**
  Esta técnica se utiliza para descomponer un evento de manera lógica a través de una secuencia de acciones que llevan a varios resultados posibles (deseados y no deseados) con diferentes consecuencias sobre el proyecto.

A continuación se dan mayores detalles sobre la aplicación de estas herramientas, tal como se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Herramientas del Análisis Cuantitativo de Riesgos.

Herramienta	¿Cuándo?	¿Cómo?	Información clave
Simulación de Monte Carlo	Cuando se tiene que determinar la distribución de probabilidades de los resultados de un evento.	Se construye un modelo de hoja de cálculo, reemplazando los valores puntuales por distribuciones de probabilidad y luego se usa un programa como el Crystal Ball u otro similar	Se debe desarrollar un modelo de simulación y recolectar datos probabilísticos.
Análisis por Arbol de Fallas.	Cuando se tiene que determinar la confiabilidad de un sistema.	Se determinan los datos de falla de los componentes del sistema y se construye un árbol de decisión usando un programa como el Decision Tree u otro similar.	Se deben desarrollar diagramas lógicos para calcular la probabilidad de falla de todo el sistema.
Análisis por Arbol de Eventos.	Cuando se tiene que determinar la probabilidad de ocurrencia de una serie de eventos, que dependen de varios factores.	Se determinan los datos de falla y se construye un árbol de decisión usando un programa como el Decision Tree u otro similar.	Una vez seleccionada la frecuencia inicial del evento, el mismo se evalúa a través del árbol de eventos que lo define. Se asocian probabilidades para cada nodo en el árbol y se determinan las probabilidades finales de las ramas de dicho árbol.

En este trabajo se enfocará la atención hacia el uso de la simulación de Monte Carlo como herramienta para la cuantificación de los eventos de riesgo, por lo que en la siguiente sección se presenta una descripción más detallada de esta técnica.

4.3.7 Simulación

Introducción

En las ciencias administrativas existen diversas herramientas y técnicas para modelar, analizar y resolver problemas complejos de toma de decisiones. Estas herramientas incluyen: programación lineal, análisis de decisión, teoría de

colas, series de tiempo, pronósticos, etc. Muchas de estas técnicas se ocupan de la formulación de modelos que puedan resolverse en forma analítica y en casi todas ellas el objetivo es determinar soluciones óptimas. Sin embargo, debido a su complejidad, no todos los problemas del mundo real se pueden representar adecuadamente en forma de modelos como los mencionados. Los intentos por usar modelos analíticos en sistemas reales, en general necesitan de tantas hipótesis de simplificación que es probable que las soluciones no sean buenas, o bien inadecuadas para su realización. En estos casos, con frecuencia la única solución de modelaje y análisis de que dispone quien toma las decisiones es la simulación.

Se puede definir a la *simulación* como la técnica que imita el funcionamiento de un sistema del mundo real cuando evoluciona en el tiempo. Esto se hace al crear un modelo de simulación. Un *modelo de simulación* toma la forma de un conjunto de hipótesis acerca del funcionamiento del sistema, expresado como relaciones matemáticas o lógicas entre los objetos y variables de interés del sistema. En contraste con las soluciones matemáticas exactas disponibles en la mayoría de los modelos analíticos, el proceso de simulación incluye la ejecución del modelo a través del tiempo para generar muestras representativas de las mediciones del desempeño o funcionamiento. En este aspecto, se puede considerar a la simulación como un experimento de muestreo acerca del sistema real, cuyos resultados son puntos de muestra. Es claro que mientras más puntos de muestra se generen, mejor será la estimación. Sin embargo, hay otros factores que tienen influencia sobre la bondad de la estimación final, como las condiciones iniciales de la simulación, la longitud del intervalo que se simula y la exactitud del modelo mismo.

La ventaja principal de la simulación es que su aplicación es relativamente directa. En general, los métodos de simulación son más fáciles de aplicar que los métodos analíticos. En tanto que los métodos analíticos necesitan muchas simplificaciones, los modelos de simulación tienen pocas restricciones y, por lo

tanto, permiten una flexibilidad mucho mayor en la representación del sistema real. Una vez formulado un modelo se puede usar en forma repetida para analizar diversas políticas, parámetros o diseños. Sin embargo, se debe hacer notar que la simulación no es una técnica de optimización; se usa con más frecuencia para analizar preguntas del tipo **"¿Qué sucede si...?"**. Es posible optimizar con la simulación pero, en general, es un proceso que consume bastante tiempo, por lo que a través del uso de computadoras, con cada vez mayor velocidad de procesamiento, es posible realizar miles de iteraciones en cuestión de minutos, lo cual lleva a una mejor toma de decisiones debido a la calidad de la información que se genera.

Modelos y simulación. Terminología básica

La mayor parte de los estudios de simulación se encargan de modelar algún sistema, el cual se define como un conjunto de entidades que interactúan para la realización de un fin lógico. En la práctica esta definición tiende a ser más flexible y la descripción exacta del sistema depende de los objetivos del estudio de la simulación.

Los sistemas tienden en general a ser dinámicos; esto es, que son variables en el tiempo, lo cual se describe a través del concepto de estado de un sistema, definido como el conjunto de variables necesarias para describir la condición del sistema en un momento determinado.

Los sistemas se pueden clasificar en discretos y continuos:

- Un *sistema discreto* es aquel en el cual las variables de estado cambian sólo en puntos discretos o contables en el tiempo.
- Un *sistema continuo* es aquel en el cual las variables de estado cambian en forma continua a través del tiempo.

Hay dos tipos de modelos de simulación: estáticos y dinámicos.

- Un *modelo estático* de simulación es una representación de un sistema en

determinado punto en el tiempo. En general, se **denomina simulación de Monte Carlo** a una simulación estática.

- Un *modelo dinámico* de simulación es una representación de cómo evoluciona un sistema a través del tiempo.

Dentro de estas clasificaciones, una simulación puede ser determinística o probabilística (estocástica). Un modelo determinístico de simulación es aquel que no contiene variables aleatorias; mientras que un modelo estocástico de simulación contiene una o más variables aleatorias.

Los modelos estocásticos discretos o modelos de simulación de evento discreto permiten estudiar un sistema estocástico a medida que evoluciona a través del tiempo mediante una representación en la que las variables de estado cambian sólo en puntos discretos del tiempo.

La simulación de Monte Carlo es, básicamente, un experimento muestral cuyo propósito es estimar la distribución de una variable de salida que depende de una o más variables de entrada probabilísticas. Se utiliza frecuentemente para evaluar el impacto esperado de los cambios de políticas en un proceso y el riesgo existente en la toma de decisiones.

Ejemplo de una simulación de Monte Carlo

La tienda UCAB vende dos tipos de productos (A y B). En ciertos periodos especiales del año, la tienda debe colocar órdenes de compra del producto A por adelantado. El producto A se compra a $7.50 por caja y se vende a $12.00. A las cajas que no son vendidas en esos periodos especiales se les hace un descuento de 50%. Históricamente, la tienda UCAB ha vendido entre 40 y 90 cajas cada año sin una tendencia aparente. El dilema al que se enfrenta el dueño de la tienda es decidir cuantas cajas del producto A ordenar para estos periodos especiales. Si la demanda excede la cantidad ordenada, la tienda pierde oportunidades de venta. Por otro lado, si se compran muchas cajas del producto A, también se pierde

dinero debido al descuento por debajo del costo.

Se puede desarrollar una expresión para la ganancia (pérdida) de la tienda si se coloca una orden de Q cajas del producto A y hay una demanda de D cajas:

$$\text{Beneficio} = \begin{cases} 12D - 7.50Q + 6(Q-D) & \text{si } D \leq Q \quad \text{(a)} \\ 12Q - 7.50Q & \text{si } D > Q \quad \text{(b)} \end{cases}$$

Las variables de entrada de un modelo de simulación para esta situación son las siguientes:

1. La cantidad a ordenar del producto A (Q).
2. Los factores de ganancia y costo (constantes).
3. La demanda del producto A (D), que es una variable aleatoria.

La variable de salida de este modelo es el beneficio neto definido por las ecuaciones anteriores.

Debido a que la demanda es probabilística, es necesario “hacer un muestreo” sobre los posibles valores a partir de una distribución de probabilidad. Para simplificar el problema, se asume que la demanda puede ser 40, 50, 60, 70, 80 ó 90 cajas con igual probabilidad de ocurrencia (1/6). Esto permite generar muestras a través del lanzamiento de un dado, tal como se muestra a continuación:

Lanzamiento de un dado	**Demanda**
1	40
2	50
3	60
4	70
5	80
6	90

Se realizará una simulación de Monte Carlo para Q = 60. La simulación procede de la siguiente manera:

1. Lanzar el dado
2. Determinar la demanda D, de la tabla anterior.
3. Usando Q = 60, calcular el beneficio usando las ecuaciones mostradas anteriormente.
4. Registrar el beneficio.

Por ejemplo, supóngase que el primer lanzamiento del dado es 4, lo cual corresponde a una demanda de 70. Dado que D = 70 > Q = 60, se usa la ecuación (b) para calcular el beneficio:

Beneficio = 12(60) – 7.50(60) = $270

Repitiendo la simulación puede desarrollarse una distribución de probabilidad del beneficio y así manejar el riesgo. La siguiente tabla muestra los resultados para 10 iteraciones de la simulación.

Iteración	Lanzamiento de un dado	Demanda	Beneficio
1	5	80	270
2	3	60	270
3	2	50	210
4	4	70	270
5	1	40	150
6	3	60	270
7	5	80	270
8	6	90	270
9	2	50	210
10	3	60	270
		Promedio	246

Debe observarse que si se repite nuevamente la simulación, se esperan obtener distintos valores al lanzar el dado y probablemente un valor diferente para el beneficio promedio, así como la distribución de frecuencias asociada. Esto muestra un punto importante en cuanto a la naturaleza de la técnica de

simulación; se trata de un experimento de muestreo que es, en sí mismo, incierto. Por lo tanto, hay que buscar la forma de cuantificar la incertidumbre en los resultados obtenidos.

En conclusión, este ejemplo permite mostrar la naturaleza de la simulación de Monte Carlo, esto es, muestreo repetido al azar a partir de distribuciones de probabilidad de variables de entrada del modelo, para desarrollar la distribución de probabilidad de una variable de salida.

El proceso de simulación

El uso efectivo de las técnicas de simulación requiere prestar especial atención al proceso de modelaje y posterior implantación. El proceso de simulación consiste de cinco pasos esenciales:

1. **Desarrollo de un modelo conceptual del sistema o problema bajo estudio.** Este paso comienza por entender y definir el problema, identificar los objetivos del estudio, determinar las variables de entrada y salida más importantes. También puede incluir una descripción lógica y detallada del sistema bajo estudio.
2. **Construcción del modelo de simulación.** Esto incluye desarrollar fórmulas o ecuaciones apropiadas, recolectar los datos necesarios, determinar las distribuciones de probabilidad de las variables aleatorias y elaborar un formato para el registro de los resultados.
3. **Verificación y validación del modelo.** La verificación se refiere al proceso de asegurar que el modelo no tiene errores de lógica, es decir, que hace lo que se supone debe hacer. La validación asegura que el modelo es una representación razonable del sistema o problema bajo estudio.
4. **Diseño de experimentos usando el modelo.** Este paso implica determinar los valores de las variables controlables bajo estudio y responder las preguntas necesarias que permitan cumplir los objetivos de la persona que toma las decisiones.

5. **Ejecución de los experimentos y análisis de los resultados.** Realizar las simulaciones apropiadas para obtener la información requerida que permita tomar decisiones y resolver el problema planteado.

Un modelo de simulación debe ser lo suficientemente bueno de tal forma que se puedan tomar decisiones usando los resultados de la simulación similares a aquéllas que se tomarían con el mismo tipo de datos de un sistema real. Las personas que toman decisiones deben confiar que están utilizando modelos útiles.

Beneficios y limitaciones de la simulación

Las técnicas de simulación tienen muchos beneficios. Primero, permiten evaluar sistemas o decisiones sin necesidad de construirlos o implantarlos; más aún, permiten experimentar con los sistemas existentes sin interferir con su funcionamiento normal. Segundo, los modelos de simulación son mucho más fáciles de entender que muchos modelos analíticos, por lo que el enfoque de la simulación genera un nivel de mayor confianza en la solución. Tercero, la habilidad de modelar cualquier restricción, particularmente cuando las herramientas analíticas son inapropiadas o no existen, hace de la simulación una herramienta muy versátil que la diferencia de otras técnicas.

Sin embargo, la simulación también tiene sus desventajas. En general, se requiere de bastante tiempo para obtener los datos necesarios, desarrollar el modelo de simulación y el programa de computadora e interpretar los resultados. Así que si se necesita tomar una decisión rápidamente, un modelo de simulación que requiera de horas para correr en una PC es poco práctico. Una segunda limitación tiene que ver con la carencia de respuestas precisas; el resultado de una simulación es uno de muchos posibles valores de la variable de salida del modelo. Por lo tanto, es necesario repetir la simulación muchas veces para caracterizar la distribución de las variables de salida e identificar valores extremos que pudieran ocurrir.

Simulación en hojas de cálculo

La Figura 4.13 muestra una hoja de cálculo de MS Excel para el modelo de ventas del ejemplo desarrollado anteriormente. Los datos de entrada se presentan en las columnas A y B. Un formato para los resultados de la simulación se muestra en las columnas D, E y F. Se ha utilizado la función de MS Excel =SI para seleccionar entre la ecuación (a) y (b) que calcula el beneficio, dependiendo si la demanda es mayor o menor que la orden de compra.

	A	B	C	D	E	F	G
1	**Simulación Empresa UCAB**			**Resultados de la simulación**			
2				**Iteración**	**Demanda**	**Beneficio**	
3	Precio de venta	$12,00		1	40	$150,00	
4	Costo	$7,50		2	50	$210,00	
5	Precio de descuento	$6,00		3	60	$270,00	
6				4	70	$270,00	
7	**Demanda**	**Probabilidad**		5	80	$270,00	
8	40	1/6		6	90	$270,00	
9	50	1/6		7			
10	60	1/6		8			
11	70	1/6		9			
12	80	1/6		10			
13	90	1/6					
14							
15	**Orden de compra**	**60**					
16							

Figura 4.13: Hoja de cálculo para el ejemplo de la empresa UCAB.

Cada fila de la tabla de resultados representa una iteración de la simulación; hasta este punto no se ha descrito como generar los valores de demanda a partir de una distribución de probabilidad, simplemente se han introducido estos valores en el rango de celdas E3:E8 para verificar las fórmulas de la columna F. Para correr la simulación correctamente, cada valor de la columna E debería escogerse aleatoriamente a partir de la distribución de probabilidad de la demanda, lo que se explicó anteriormente a través del lanzamiento de un dado.

Generación de valores probabilísticos

En este ejemplo es necesario simular el proceso de lanzar un dado en una hoja de cálculo para generar las respuestas propias de la simulación. El lanzamiento de un dado es un experimento físico que genera, de forma aleatoria,

un número entre 1 y 6, cada uno con igual probabilidad. Sin embargo, para problemas de simulación más complejos es necesario generar resultados a partir de muchos tipos diferentes de distribuciones de probabilidad.

La base para generar valores a partir de una distribución de probabilidad cualquiera es el concepto de número aleatorio. En la terminología de simulación, un **número aleatorio** es aquel que está uniformemente distribuido entre 0 y 1. Cualquier paquete de computación tiene la capacidad de generar números aleatorios independientes entre sí.

En MS Excel se pueden generar números aleatorios en cualquier celda usando la función =ALEATORIO(). Esta función no tiene argumentos, por lo que no se coloca ningún valor dentro del paréntesis. La Figura 4.14 muestra una tabla de 100 números aleatorios generados en MS Excel usando esta función.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	**Números Aleatorios**									
2										
3	0,8045	0,1722	0,3695	0,5428	0,8523	0,3380	0,6533	0,2209	0,7163	0,2065
4	0,8379	0,8376	0,0780	0,3588	0,0087	0,0669	0,3827	0,8277	0,9593	0,8670
5	0,7531	0,4146	0,8735	0,4850	0,6364	0,6861	0,7843	0,3115	0,5329	0,0830
6	0,2871	0,6165	0,7337	0,3563	0,2351	0,5649	0,8718	0,1495	0,0409	0,2916
7	0,9014	0,1494	0,8192	0,0449	0,1988	0,0692	0,8895	0,2069	0,9095	0,5529
8	0,3880	0,0522	0,7777	0,3866	0,1828	0,1154	0,4801	0,4150	0,9566	0,7061
9	0,1814	0,2314	0,8879	0,4201	0,5655	0,2785	0,4776	0,8373	0,7674	0,3668
10	0,5213	0,0888	0,2851	0,1399	0,5071	0,7357	0,7702	0,1060	0,2933	0,0418
11	0,7696	0,2893	0,0686	0,4757	0,6114	0,4718	0,3783	0,8162	0,4666	0,4068
12	0,3028	0,2746	0,6775	0,7106	0,6689	0,6935	0,2840	0,7229	0,3973	0,8316
13										
14										

Figura 4.14: Números aleatorios generados en MS Excel.

Muestreo aleatorio y enfoque de la simulación de Monte Carlo

En el ejemplo explicado anteriormente es necesario simular el proceso de lanzamiento de un dado. En términos más generales, se necesita seleccionar aleatoriamente un valor x de la siguiente distribución discreta de probabilidad:

x	p(x)
1	1/6
2	1/6
3	1/6
4	1/6
5	1/6
6	1/6

Dos propiedades de las distribuciones discretas de probabilidad que permiten usar números aleatorios para generar valores probabilísticos son:

1) la probabilidad de cualquier valor x siempre está entre 0 y 1 ($0 \leq p(x) \leq 1$).
2) la suma de las probabilidades de todos los valores es 1 ($\Sigma\, p(x) = 1$)

Por lo tanto, se puede descomponer el intervalo de 0 a 1 en subintervalos que corresponden a las probabilidades de los valores discretos; cualquier número aleatorio debe caer en alguno de esos subintervalos. Para poder ver esto con mayor claridad, primero se construye la distribución de probabilidades acumuladas, definida como P(x):

x	p(x)	P(x)
1	1/6	1/6
2	1/6	1/3
3	1/6	½
4	1/6	2/3
5	1/6	5/6
6	1/6	1

La distribución de probabilidades acumulada divide al intervalo 0 a 1 en subintervalos cuya longitud es igual a las probabilidades de los valores x asociados, como se muestra en la Figura 4.15.

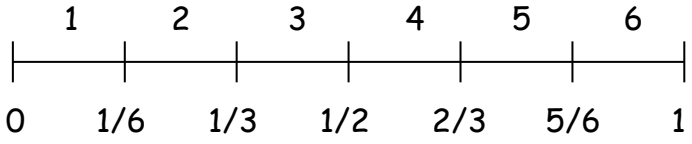


Figura 4.15: Partición del intervalo (0,1) en subintervalos de igual longitud.

Por ejemplo, el intervalo de 0 a 1/6 (no incluyendo 1/6) corresponde al valor x = 1, el intervalo de 1/6 a 1/3 corresponde al valor x = 2 y así sucesivamente. Para generar un valor x a partir de esta distribución, todo lo que hay que hacer es seleccionar un número aleatorio y determinar el intervalo en el cual cae. Supóngase que se utiliza la primera columna de la Figura 4.16, el primer número aleatorio es 0,8045 que está en el intervalo (2/3,5/6) y por lo tanto corresponde al valor x = 5. El segundo número aleatorio es 0,8379 que está en el intervalo (5/6,1) y por lo tanto corresponde a x = 6. De esta manera, se ha desarrollado un método numérico para simular el lanzamiento de un dado.

La simulación de Monte Carlo consiste básicamente en el muestreo aleatorio de cada distribución de probabilidad dentro de un modelo para generar cientos o miles de escenarios (iteraciones), donde cada distribución se muestrea de modo que reproduzca su forma original. La distribución de probabilidad calculada para las variables de salida del modelo refleja la probabilidad de ocurrencia de todos los valores que pueden tomar las variables de entrada.

La simulación de monte Carlo consiste en la obtención de números aleatorios de acuerdo a una distribución de probabilidad deseada a partir de una sucesión de números aleatorios distribuidos uniformemente entre 0 y 1. Para ello se evalúa el inverso de la distribución de probabilidad acumulada, teniendo como entrada una sucesión de números aleatorios distribuidos uniformemente. En términos más sencillos, cada número aleatorio generado se aplica al eje Y de la distribución de probabilidad acumulada, tal como se muestra en la Figura 4.16. Este valor de la distribución acumulada se relaciona con un valor específico en el eje X, el cual corresponde con el valor que se usa en la simulación. Cuando se repite este procedimiento muchas veces, el número de muestras tomadas en cada intervalo del eje x se ajusta a la forma de la distribución de probabilidad.

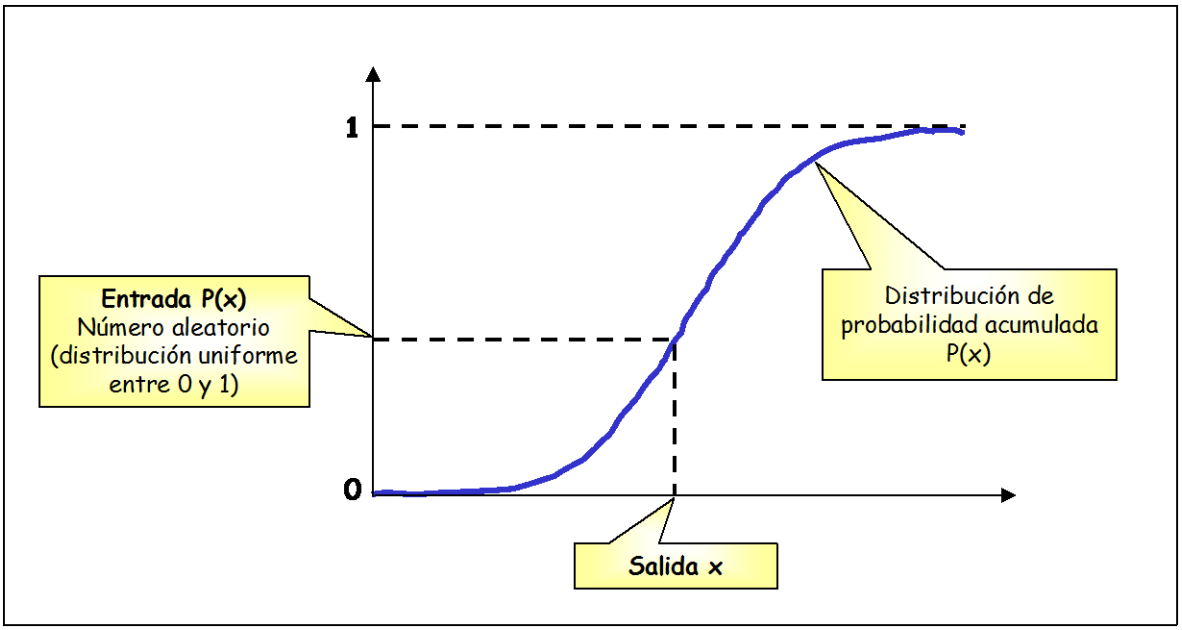


Figura 4.16: Muestreo aleatorio en la simulación de Monte Carlo.

5. DESARROLLO DEL TRABAJO

5.1 CONCEPTOS BÁSICOS EN PERFORACIÓN DE POZOS PETROLEROS

5.1.1 Explotación de yacimientos

La teoría más aceptada con respecto a la formación de los hidrocarburos es la que establece que estos se forman por la transformación de la materia orgánica debido a efectos de microorganismos, presión, temperatura y otros factores. Se piensa que por lo general estos hidrocarburos migran hasta que son atrapados en una estructura geológica o trampa que les impide su movimiento constituyendo así un yacimiento.

Un yacimiento de hidrocarburos puede definirse como una porción porosa y permeable de la corteza terrestre, de volumen limitado y entrampado, que contiene petróleo y/o gas a una determinada presión y temperatura en cantidades comercialmente explotables. El esquema general de un yacimiento se muestra en la Figura 5.1.

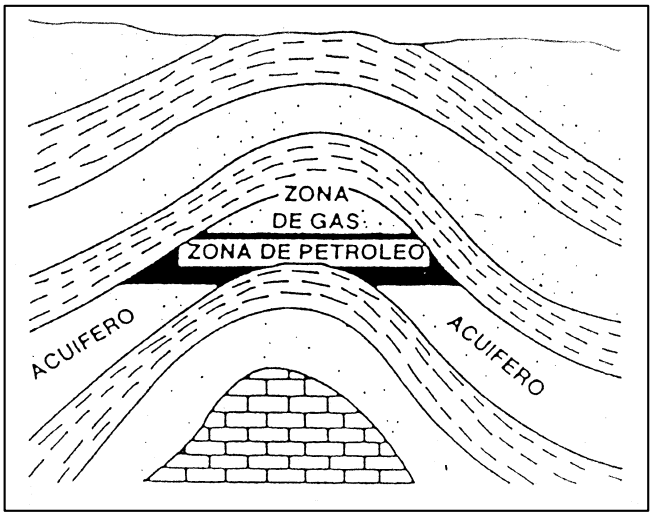


Figura 5.1: Esquema general de un yacimiento de hidrocarburos.

Los hidrocarburos contenidos en los yacimientos son, por lo tanto, mezclas muy complejas de muchos componentes y esta mezcla puede estar en forma líquida y/o gaseosa, dependiendo de las presiones y temperaturas existentes en el yacimiento. De esta manera, estos fluidos pueden estar distribuidos por acción de la gravedad, formando capas o zonas de gas, petróleo y agua.

Esto significa que los yacimientos están ubicados en algún lugar y para obtener beneficios de ellos es necesario ubicarlos y luego extraer los hidrocarburos contenidos en ellos. De esta manera, las principales actividades medulares de toda empresa petrolera son la exploración y la explotación, como se indica en la Figura 5.2.

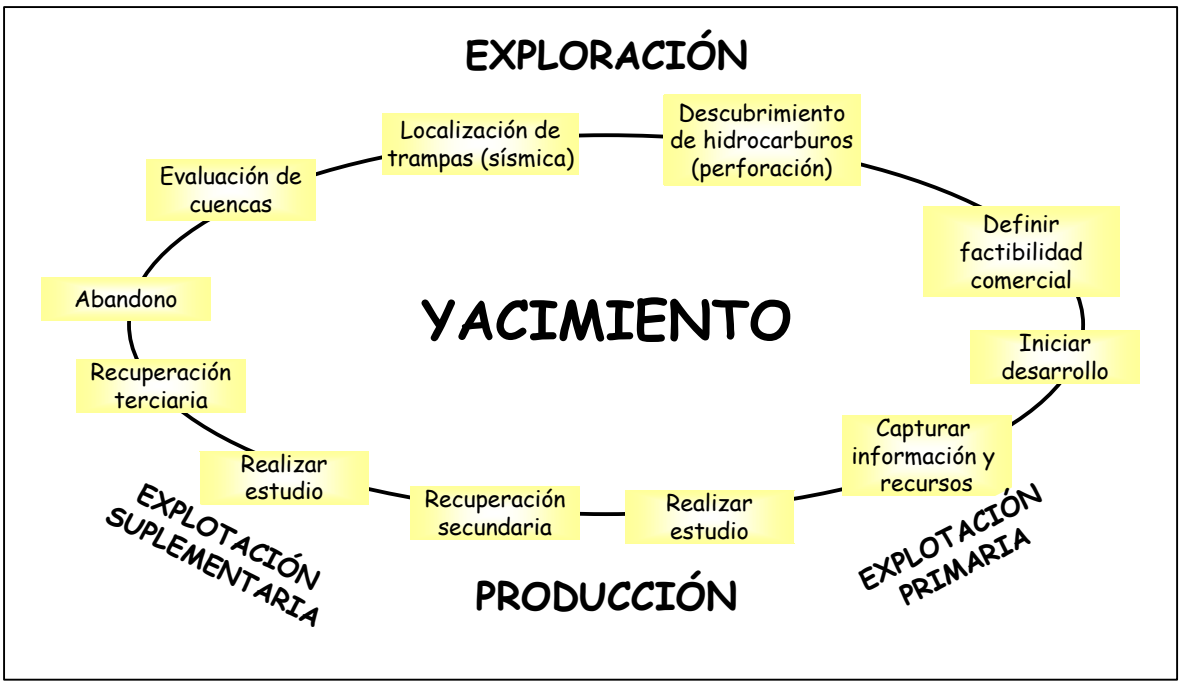


Figura 5.2: Actividades medulares de toda industria petrolera.

En la exploración se ubican las estructuras geológicas o trampas capaces de contener hidrocarburos mediante métodos sísmicos, se verifica y cuantifica el contenido de hidrocarburos en ellas mediante la evaluación de pozos que lleguen hasta dicha trampa.

Una vez establecida la presencia de hidrocarburos en las trampas en cantidades comerciales, se procede a la explotación de las mismas, lo cual consiste en extraer, procesar y transportar dichos hidrocarburos. Para esto último es necesario construir las instalaciones requeridas tal como se muestra en la Figura 5.3.

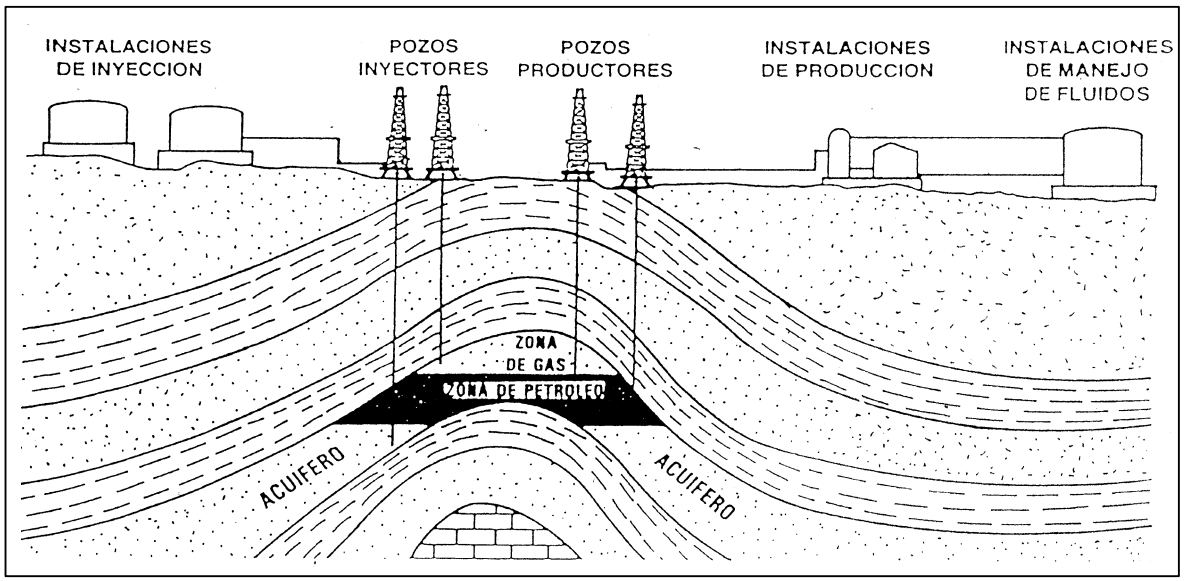


Figura 5.3: Instalaciones de explotación de un yacimiento.

Por lo tanto, lo primero que debe hacerse es perforar los pozos que comuniquen al yacimiento con la superficie y de esta manera ser el conducto para el movimiento de los fluidos desde el yacimiento hasta las instalaciones de superficie. Esta perforación se lleva a cabo con una unidad llamada taladro (Figura 5.4), el cual está conformado por una serie de equipos, utiliza varios tipos de materiales e insumos y es operado por un grupo llamado cuadrilla de perforación.

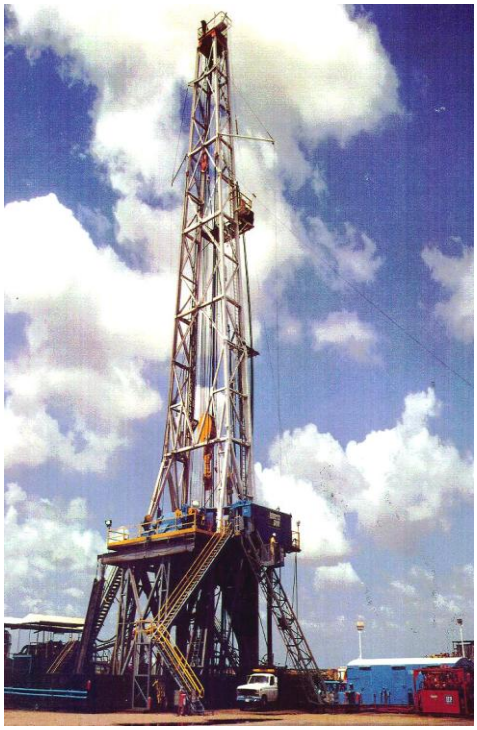


Figura 5.4: Taladro de perforación.

Una vez que los pozos son perforados, acondicionados o incorporados al resto de las instalaciones de superficie, se convierten en pozos productores. En el proceso de producción, los fluidos se mueven dentro del yacimiento hacia el fondo de los pozos y de allí hasta las instalaciones de superficie, a través de los mismos pozos, gracias a la energía existente en el yacimiento.

5.1.2 Perforación de pozos

En la industria petrolera, la perforación de pozos es de importancia primordial: sin un pozo –un sencillo y a la vez complejo hoyo en el subsuelo– no hay manera de extraer hidrocarburos de los yacimientos. Básicamente, las personas envueltas directamente en la perforación son empleadas por compañías operadoras, contratistas de perforación y varias compañías de servicios y materiales.

El área de perforación –la localización en la cual el pozo será perforado– es seleccionada por la compañía operadora. La selección del punto de perforación se basa en varios factores. El factor más importante es el geológico; la compañía tiene que tener razón para creer que existen hidrocarburos (petróleo y/o gas) en el subsuelo donde se va a comenzar la perforación. Estudios geológicos dan indicios si existen o no estos depósitos. Para determinar si existen estos depósitos, la compañía operadora emplea a sus geólogos y geofísicos, cuya especialidad es localizar posibles yacimientos de hidrocarburos.

En adición a los factores geológicos, hay factores legales y económicos que tienen que ser considerados. Por ejemplo, la compañía tiene que obtener derechos a perforar y producir petróleo y gas en la localización. La compañía debe disponer de recursos financieros para comprar los derechos o arrendar el sitio y también pagar el costo de las operaciones de perforación. Todos estos factores y otros tienen que ser tomados en cuenta antes de comenzar una perforación

Los pozos generalmente son clasificados en dos categorías: pozos exploratorios y pozos de desarrollo.

Un *pozo exploratorio* es aquel que se perfora primordialmente con el propósito de determinar si existen depósitos de hidrocarburos en un yacimiento. Antes de perforar el pozo, no es más que una conjetura que existen hidrocarburos en el yacimiento. No se sabe si en realidad existe petróleo o gas hasta que se ha terminado la perforación.

Un *pozo de desarrollo* es un pozo que se perfora luego de haber terminado un pozo exploratorio que ha confirmado que existen hidrocarburos en la formación. Casi siempre se necesitan varios pozos de desarrollo o producción para producir hidrocarburos eficientemente de un yacimiento.

5.1.3 Procesos operacionales de la perforación de pozos

De manera muy simple y resumida, las operaciones normales de perforación de pozos comprenden las siguientes etapas:

- Actividades previas a la mudanza del taladro.
  - Inicializar el pozo en la base de datos de Ingeniería de Perforación.
  - Ejecutar de órdenes de servicios.
  - Revisar del plan de perforación.
  - Transportar los materiales a la localización de perforación.
- Mudanza del taladro.
  - Desvestir.
  - Mudar el equipo.
  - Vestir.
- Perforación de la sección superficial.
  - Perforar.
  - Correr pérfiles eléctricos.
  - Revestir y cementar.
  - Instalar válvula impide reventones (BOP).
- Perforación de la(s) sección(es) intermedia(s).
  - Perforar.
  - Correr perfiles electricos.
  - Revestir y cementar.
  - Instalar BOP.
- Perforación de la sección de producción.
  - Perforar.
  - Correr perfiles eléctricos.
  - Revestir y cementar.
  - Realizar prueba.
- Completación del pozo.

En la Figura 5.5 se muestra el esquema mecánico de un pozo vertical típico, donde se pueden apreciar las distintas etapas de la perforación anteriormente mencionadas.

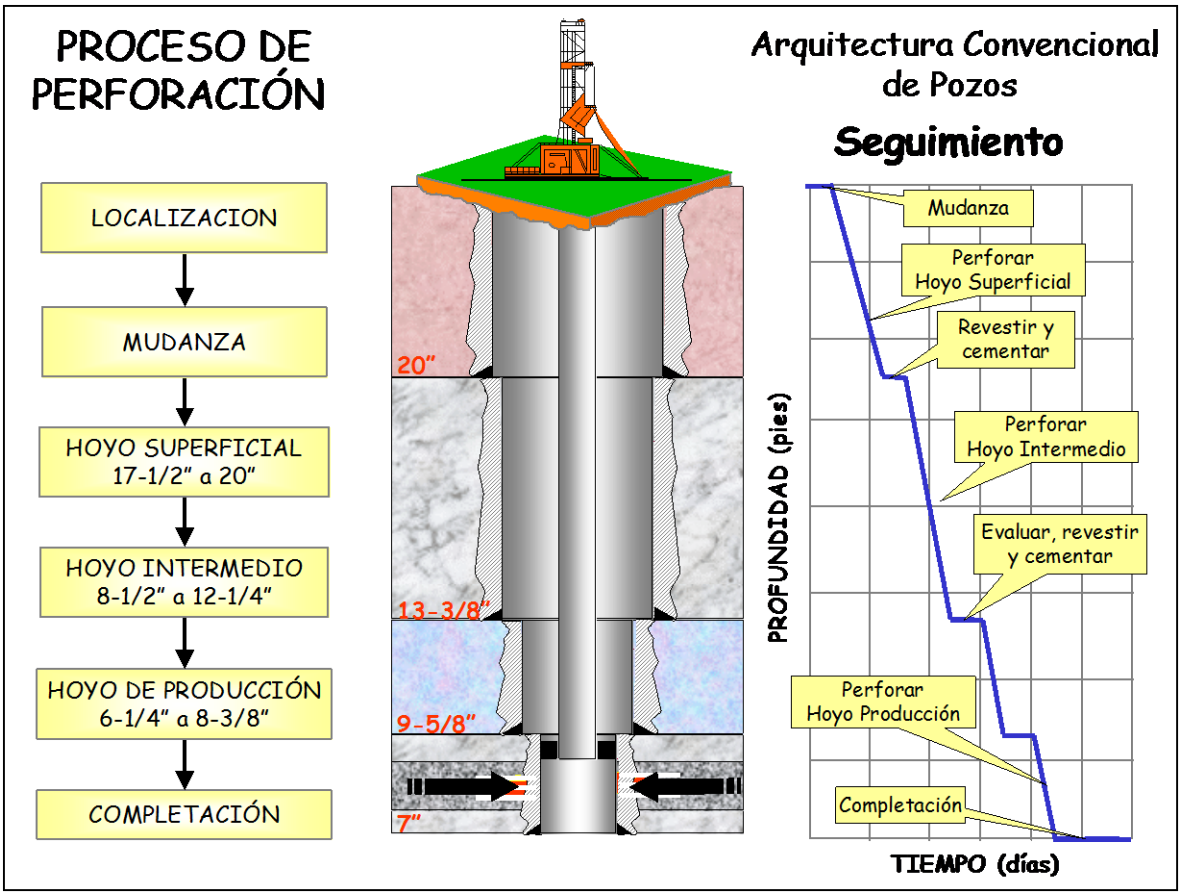


Figura 5.5: Esquema mecánico de un pozo vertical.

5.1.4 Perforación y rehabilitación de pozos en PDVSA

La Gerencia de Perforación y Rehabilitación de Pozos en PDVSA está adscrita a la Gerencia Técnica de la Unidad de Negocios de Producción y su objetivo es el de velar por todos los aspectos técnicos, operacionales y de negocios relacionados con el proceso de construcción y mantenimiento de pozos a escala nacional. En el ámbito de la Gerencia Técnica de Producción conforma un centro de excelencia para la realización de la actividad de perforación y rehabilitación de pozos de desarrollo y para la evaluación de prospectos (pozos exploratorios) de PDVSA. Esta organización además consolida las áreas de planificación y control de gestión, diseño, procesos operacionales, fluidos de perforación y rehabilitación, cementación y procesos de completación e intervenciones a pozos. Cada una de estas áreas es liderada por personal técnico

altamente calificado que conforma grupos de afinidad técnica o Comunidades de Conocimiento, las cuales tienen inherencia a nivel corporativo.

Por lo tanto, la **misión** de la Gerencia de Perforación y Rehabilitación de Pozos es garantizar que el proceso de construcción y mantenimiento de pozos de PDVSA contribuya con estándares de clase mundial, a la creación de valor para la corporación mediante el uso eficiente del conocimiento y la tecnología y en armonía con el entorno y el medio ambiente.

5.2 MANEJO DEL RIESGO EN PROYECTOS DE PERFORACIÓN DE POZOS

5.2.1 Introducción

Las empresas operadoras de Exploración y Producción (E&P) invierten alrededor de 20 mil millones de dólares por año en tareas de perforación de pozos. Lamentablemente no todo ese dinero se utiliza en forma adecuada, ya que alrededor de 15% se asigna a pérdidas. Estas pérdidas comprenden las pérdidas de material, como equipos de perforación y fluidos, y pérdidas de continuidad de los procesos de perforación, las cuales se originan durante la búsqueda e implantación de soluciones para resolver los problemas de perforación. Si se pudieran evitar estos problemas, se reducirían los costos de exploración y desarrollo, y los miles de millones de dólares que se pierden hoy en día se podrían destinar a seguir mejorando los procesos.

El manejo del riesgo durante la perforación de pozos significa no dejar que los problemas menores se transformen en problemas mayores. Si se identifican los riesgos y se anticipan los eventos indeseables, se pueden reducir las sorpresas. Debe recordarse que la mayor parte del tiempo dedicado a la perforación, y la mayor parte de los costos, no ocurren mientras se atraviesa el yacimiento sino en llegar hasta el mismo.

No son pocos los problemas que se presentan durante las operaciones de perforación y las soluciones suelen ser costosas y, en ciertos casos, hasta imposibles (Véase la Figura 5.6)

- Pueden producirse atascamientos de la sarta de perforación contra las paredes del pozo por presión diferencial, o atascamientos en las irregularidades del pozo, lo que requiere cierta habilidad y fuerza para liberarla. Si esto no da resultado, en ciertos casos la única solución consiste en abandonar la porción de sarta atascada y desviar la trayectoria del pozo, modificando así todo el

programa de perforación, con el consiguiente aumento de los costos del pozo; los gastos adicionales pueden alcanzar millones de dólares.

- Cuando se utiliza una alta tasa de penetración se reducen los costos y el tiempo de operación; pero si además, la tasa de rotación de la sarta de perforación es muy baja o la tasa de flujo del lodo no logra levantar los ripios de roca a la superficie, se produce un atascamiento.
- Las fallas y las fracturas que se encuentran en la trayectoria del hoyo abren conductos que facilitan la pérdida del fluido de perforación hacia la formación. Si la presión del fluido es excesivamente alta puede fracturar la formación y provocar pérdidas de circulación. Si, por el contrario, fuera demasiado baja, la presión del lodo no alcanzaría a mantener bajo control las formaciones de alta presión, y se producirían surgencias imprevistas del pozo.
- Las vibraciones de la sarta de perforación pueden debilitar y destruir las tuberías y los equipos, además de dañar seriamente los pozos

Algunos de estos problemas, si bien no obligan a suspender completamente el proceso de perforación, ponen en peligro las operaciones subsiguientes de perfilaje, completación y producción.

La toma de decisiones para corregir estos problemas constituye un proceso complejo, ya que se deben tener en cuenta diversos factores. Por ejemplo, el aumento de la densidad del fluido de perforación para controlar la estabilidad del pozo en un intervalo puede provocar fracturas en otras zonas. En muchos casos, las soluciones son específicas para cada pozo o campo.

El éxito de la perforación depende, entonces, del desarrollo de un plan coherente, actualizado en forma permanente a la luz de los nuevos datos obtenidos y de mantener bien informado al personal involucrado. Dicho plan debe incluir los procedimientos a seguir bajo circunstancias normales y los métodos adecuados para tratar los problemas más serios que se puedan producir con mayor frecuencia. Si se cuenta con el entrenamiento necesario, con un proceso

de perforación bien definido y los datos y herramientas suficientes para su interpretación, la perforación exitosa de un pozo debería ser un proceso de rutina.

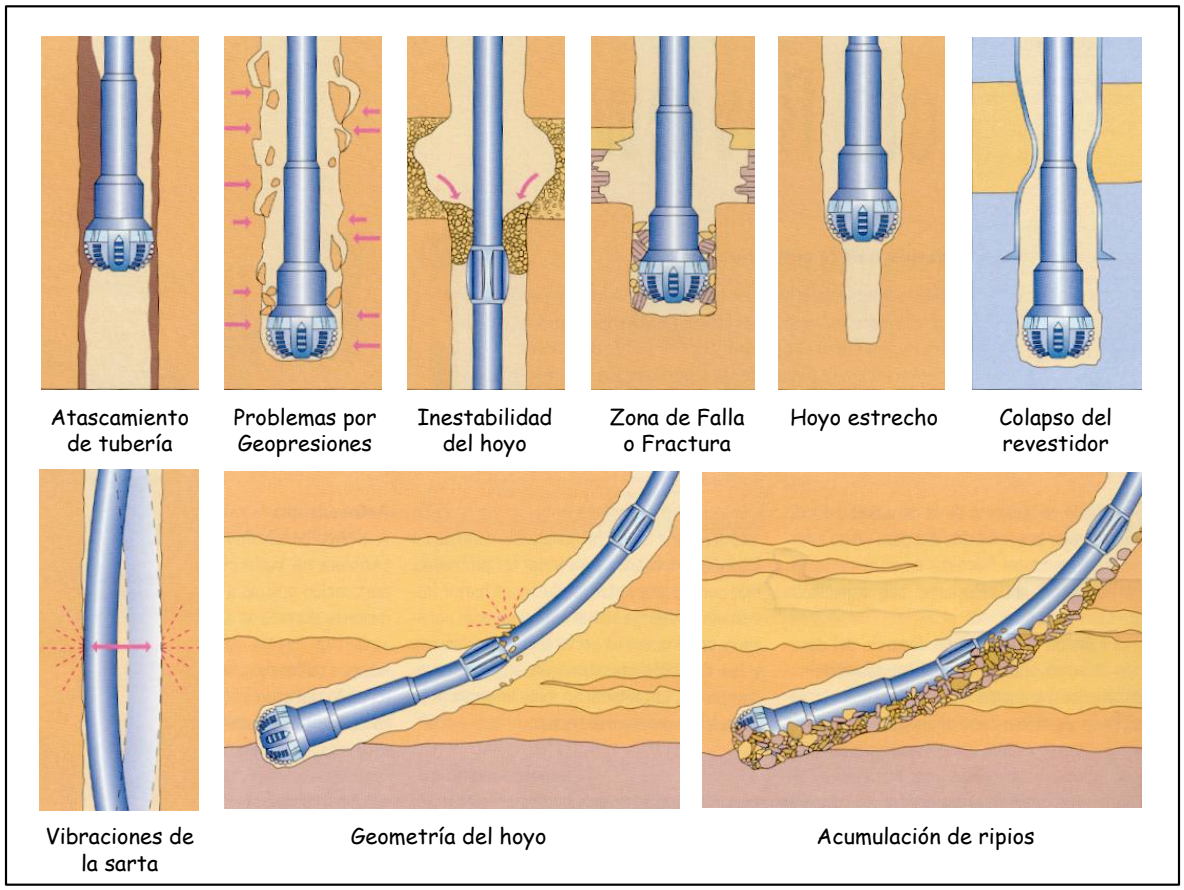


Figura 5.6: Problemas comunes durante la perforación.

5.2.2 Antecedentes

A lo largo de los últimos veinte años, la industria petrolera ha perfeccionado las operaciones de perforación gracias a la introducción de las mediciones durante la perforación (MWD – Measurement While Drilling), los motores direccionales, además de los despliegues computarizados en la locación del pozo y los perfilajes durante la perforación de alta resolución. A comienzos de la década de los 90, distintas compañías operadoras y compañías de servicios aplicaron la capacidad de las mediciones adquiridas durante la perforación en la adopción de nuevos métodos y programas de ingeniería para prevenir la ocurrencia de los problemas

antes mencionados. Entonces, ¿por qué diez años más tarde, las compañías operadoras reconocen que el proceso de perforación todavía necesita mejoras? Las fuerzas físicas que actúan sobre el pozo no se han modificado. ¿Qué es lo que ha ocurrido entonces?

Dos factores han cambiado. En primer lugar, las compañías de exploración y producción (E&P) modificaron sus estructuras internas, y redujeron sus grupos de trabajo. Muchos expertos se han visto obligados a abandonar la industria petrolera. Las compañías han reducido su personal al mínimo y la gente con experiencia que permanece en ellas, quizás esté demasiado especializada para cumplir con la función integradora que hace falta en este momento.

En segundo lugar, los pozos son cada vez más complejos. Los pozos de largo alcance y los pozos horizontales reaccionan en forma diferente a las tensiones del subsuelo, en comparación con los pozos verticales o ligeramente desviados. La perforación de pozos multilaterales requiere extraordinarios niveles de precisión y control. Los pozos en aguas profundas, sometidos a alta presión y alta temperatura presentan desafíos adicionales. Hoy en día, se perforan pozos en áreas remotas tectónicamente activas, donde es probable que no se disponga de una infraestructura bien desarrollada y que existan problemas de comunicación.

5.2.3 Un nuevo enfoque

En medio de todos estos cambios y desafíos, se hace necesario abordar el proceso de perforación de un modo diferente. En los últimos años, las compañías operadoras y las compañías de servicios comprendieron la necesidad de cooperar mutuamente de manera más estrecha para lograr sus respectivos objetivos. Surgió entonces una nueva modalidad de hacer negocios. Las compañías operadoras y las empresas de servicios abandonaron su actitud opositora y

adoptaron un enfoque de objetivos comunes para enfrentar las incertidumbres y los riesgos del subsuelo.

El proceso completo integra el trabajo del personal de las compañías operadoras y las empresas de servicio tanto en las oficinas como en la locación del pozo. Las fases del proyecto de perforación requieren el esfuerzo en conjunto de todo el personal involucrado en el proyecto y abarcan la construcción del modelo de subsuelo y la planificación del pozo, la perforación en sí misma, la detección, la interpretación de la información obtenida durante la perforación, y por último la revisión y actualización del modelo, tal como se muestra en la Figura 5.7

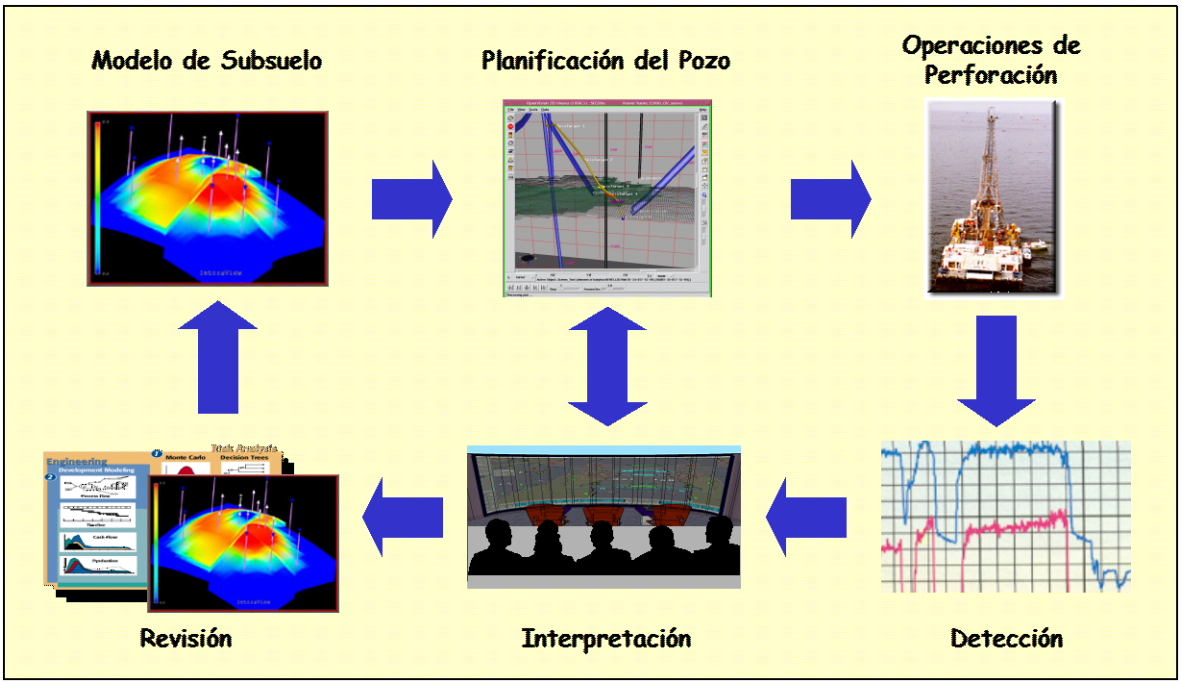


Figura 5.7: Proceso integrado de la perforación de pozos.

El proceso comienza en la oficina con la construcción de un modelo de subsuelo, que luego se utiliza como elemento clave como parte del proceso de planificación del pozo para crear el programa de perforación más adecuado. Se trata de un proceso de optimización multidisciplinario en el cual el ingeniero de perforación y el geológo equilibran los requerimientos de ubicación de objetivos, los costos y la factibilidad de la operación. Además, se deben considerar muchos

otros factores, como el diseño de revestidores, las necesidades de completación, las características del campo, el tamaño y la selección del taladro, los problemas del personal, los costos, el diseño del cemento, la sarta de perforación y el ensamblaje de fondo, además de la disponibilidad de equipos.

El programa de perforación más adecuado es aquel que optimiza la ubicación y la trayectoria del pozo, y al mismo tiempo minimiza el riesgo de inestabilidad del pozo y de atascamientos por presión diferencial, mejora la productividad y aumenta el ritmo de aprendizaje. El programa debe identificar aquellas secciones durante la perforación en las cuales los riesgos geológicos, como la presión de poro, la presión de fractura y otros factores de inestabilidad, puedan comprometer la integridad del pozo. Cualquier actividad que se emprenda debe ser evaluada cuidadosamente para detectar todos los riesgos posibles.

En la locación del pozo, el pozo se perfora según el programa de perforación. Durante la perforación, se adquieren datos, que se interpretan y se vuelcan en el proceso, en el programa de perforación o en el mismo modelo de subsuelo. Gracias a estas modificaciones y actualizaciones, el programa de perforación deja de ser un documento estático para convertirse en un documento dinámico. Los riesgos de la perforación se deben evaluar en forma permanente. Este proceso es válido para los pozos perforados a lo largo de toda la vida de un campo y se fundamenta en las tres etapas principales que rigen la existencia misma de un pozo: el desarrollo de un plan adecuado, la ejecución del mismo y el aprendizaje continuo a partir del proceso en marcha.

El modelo de subsuelo puede ser simple o complejo, dependiendo de la información disponible y de los requerimientos del pozo. La creación de un modelo del subsuelo complejo suele exigir una infinidad de pasos de ingreso de datos y de integración de los mismos. Es decir, se hace uso de todas las fuentes de datos relacionados, desde reportes de perforación, registros y pruebas en pozos desviados, hasta secciones sísmicas, cubos de velocidad e interpretaciones

estructurales (Véase la Figura 5.8). El modelo mecánico del subsuelo que se obtiene está compuestos por topes formacionales, fallas, parámetros elásticos, direcciones y variaciones de esfuerzos en función de la profundidad, y registros de resistencia de la roca y de la presión de poro.

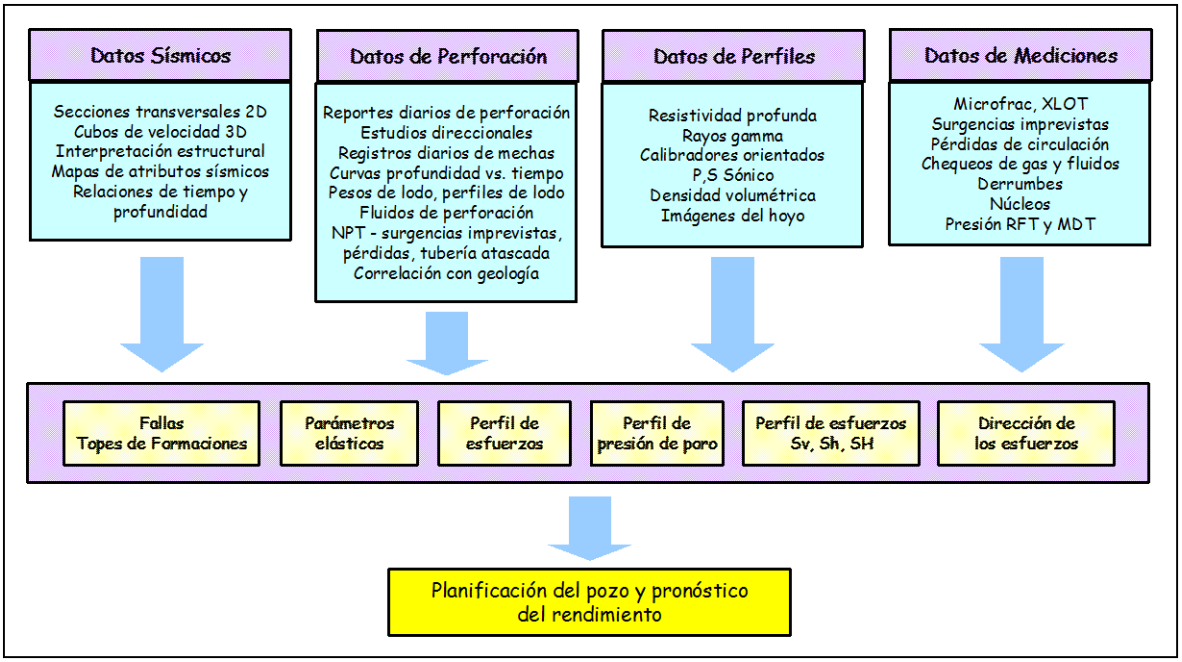


Figura 5.8: Lista parcial de los tipos de datos para definir un modelo de subsuelo.

Una vez escogidos el (los) objetivo(s) a alcanzar, se debe diseñar la trayectoria de menor riesgo para lo cual se requiere el conocimiento del estado de las tensiones y los parámetros de la roca y de la interacción del proceso de perforación con los mismos. El plan más conveniente, de acuerdo con cualquier modelo de subsuelo, debe ser compatible con los objetivos de la trayectoria del pozo en cuestión, para optimizar el proceso en forma global.

Una vez formulado el programa de perforación más conveniente, llevarlo a cabo en la locación puede significar sorprendentes desafíos. Es necesario hacer uso de una secuencia organizada de trabajo, que además incluya las herramientas de software e ingeniería que permitan garantizar que las soluciones técnicas elaboradas durante la etapa de planificación resulten efectivas en la práctica para

ayudar a tomar las decisiones que permitan evitar los problemas durante la perforación.

Los miembros del equipo de trabajo multidisciplinario en la locación del pozo trabajan en conjunto para reducir el costo y el tiempo no productivo mediante la integración de la planificación y la entrega de soluciones de perforación en tiempo real. Dentro de este esquema el MANEJO DEL RIESGO y control de las pérdidas juegan un papel clave. Este proceso se concentra en las siguientes áreas:

- Estabilidad del hoyo y pérdidas de fluidos.
- Análisis de la presión de poro.
- Atascamiento y pérdidas de las sartas de perforación en el hoyo.
- Prevención de fallas de las sartas de perforación.
- Eficiencia de perforación, tasa de penetración y optimización del rendimiento de la mecha.

Durante la etapa de planificación de los proyectos de perforación se deben identificar los problemas potenciales, desarrollar métodos para detectarlos y elaborar planes de contingencia para completar el programa de perforación. Se genera así un esquema donde se relaciona la geometría del pozo, la información geológica y los posibles problemas con los planes de contingencia para formar un mapa completo del proceso para un pozo en particular.

Durante la perforación se deben evaluar las condiciones del pozo para detectar cualquier problema nuevo que pudiera surgir y en cada revisión se elabora una evaluación de riesgos actualizada. Una planificación detallada antes de que se presente un problema y la correcta identificación del mismo, permiten reducir los riesgos de pérdidas y, al mismo tiempo, incrementar el rendimiento en forma significativa.

Los riesgos se identifican teniendo en cuenta diversos factores: el tipo de operación y el procedimiento específico que se realiza en el momento en que se presenta el problema; el tipo de riesgo y sus consecuencias; la gravedad del mismo y la probabilidad de que se produzca. Adicionalmente se deben usar sistemas que incluyan alarmas de perforación que analizan las mediciones durante la perforación en tiempo real para alertar a los perforadores sobre cualquier problema grave. Estas alarmas tienen capacidad para advertir factores de alta fricción, fallas de rodamientos, baja eficiencia de perforación y rendimiento pobre de la mecha, derrumbes y surgencias imprevistas.

Finalmente hay que indicar que todos los procesos de manejo de riesgos descritos anteriormente son posibles si se cuenta con datos de alta calidad obtenidos durante la perforación y más aún, cuando los mismos son utilizados para realizar análisis que apoyen las decisiones que se toman durante el proceso de perforación.

Este proceso comprende una serie de decisiones y acciones asociadas, que se toman durante la planificación y la ejecución de un proyecto que culmina en un pozo completado. El grado de éxito o fracaso del mismo y la eficacia de un pozo están determinados por la calidad de esas decisiones. La toma de decisiones en forma efectiva depende de contar con una visión clara de las condiciones actuales del pozo, además de comprender las consecuencias de cada decisión tomada, y de estar preparados para el futuro con planes de contingencia. De esta forma se pueden tomar mejores decisiones ya no bajo una situación de estrés que rodea a un incidente, sino antes de que éste se produzca, cuando la capacidad para tomar decisiones no se encuentre disminuida por la ansiedad y la presión.

La industria petrolera, como todas las demás, lucha por lograr mayor productividad y mejores rendimientos económicos. La eliminación de desechos y pérdidas, ya se trate de procesos o materiales, constituye un objetivo fundamental

de toda compañía exitosa, sin importar las condiciones económicas prevalecientes. El incremento de la eficacia de la perforación mediante el manejo adecuado del riesgo constituye un camino seguro para que las compañías operadoras puedan alcanzar sus objetivos.

5.3 APLICACIÓN DEL ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS EN OPERACIONES DE PERFORACIÓN

5.3.1 Descripción de la metodología a utilizar

Básicamente el alcance de este estudio es el siguiente:

- Mostrar una descripción general de las operaciones de perforación para una sección de hoyo particularmente difícil.
- Determinar la distribución de probabilidades del TIEMPO y COSTO de las operaciones de perforación para esta sección en particular.
- Determinar los riesgos que tienen mayor impacto en los resultados finales.

La metodología del Análisis Cuantitativo de Riesgos (QRA) permite identificar las variables susceptibles de afectar el desempeño del proyecto, establecer su comportamiento probabilístico y calcular mediante una técnica de simulación, como la simulación de Monte Carlo, los valores esperados del tiempo y el costo del proyecto en cada una de sus etapas, así como sus correspondientes niveles de certidumbre. Estos resultados sirven de base para estimar las probabilidades de éxito de la inversión.

El análisis supone una serie de pasos a seguir, los cuales se señalan a continuación:

1. Definición de un modelo determinístico del cálculo del tiempo y costo del proyecto, como punto de partida de la simulación.
2. Definición de todas las variables de riesgo del proyecto y su comportamiento probabilístico.
3. Aplicación de la técnica de simulación de Monte Carlo para modificar el modelo determinístico de manera que permita accesar todas las combinaciones de valores definidos para las distintas variables de riesgo.

4. Proyección de la curva de distribución del tiempo y costo del proyecto y su nivel de certidumbre.

Mediante la simulación de Monte Carlo es posible generar diferentes escenarios, ya que utiliza un proceso de muestreo al azar para cuantificar el valor esperado del proyecto. Realiza un número determinado de iteraciones dentro del rango especificado para las variables y de acuerdo a las distribuciones seleccionadas. Mediante esta aproximación se obtiene una distribución de valores para las proyecciones resultantes, a diferencia de los métodos determinísticos, los cuales generan un solo resultado. Específicamente, la simulación de Monte Carlo permite obtener distribuciones del tiempo y costo del proyecto, así como también sus respectivos niveles de certidumbre, con los cuales se identifican las probabilidades de éxito de la inversión.

5.3.2 Análisis Cuantitativo de Riesgos usando el programa Crystal Ball

El programa Crystal Ball, de la empresa Decisioneering Inc., es una herramienta para análisis de riesgo que permite automatizar el proceso mediante el cual se realizan simulaciones de Monte Carlo para el manejo de situaciones de incertidumbre en la toma de decisiones. Este programa tiene como plataforma base al programa de hoja de cálculo MS Excel, por lo que su uso es bastante sencillo para cualquier usuario familiarizado con los productos MS Office.

El programa Crystal Ball extiende las capacidades de pronóstico de un programa de hoja de cálculo y provee la información necesaria para tomar decisiones más precisas, eficientes y confiables. Al trabajar con hojas de cálculo como MS Excel se presentan dos limitaciones básicas:

- Los valores de una celda pueden cambiarse sólo uno a a la vez, lo cual no permite ver todos los posibles resultados de una variable respuesta de un modelo al cambiar las variables de entrada.

- Los análisis del tipo **"¿Qué pasa si…?"** siempre arrojan estimados puntuales que no indican la probabilidad de alcanzar un resultado en particular. Es decir, estos estimados puntuales pueden decir lo que es *posible*, pero no lo que es *probable*.

El programa Crystal Ball cubre las limitaciones mencionadas anteriormente por a las siguientes razones:

- Es posible describir un rango de posibles valores para cada variable incierta en el modelo de hoja de cálculo.
- A través de la simulación de Monte Carlo, el programa puede mostrar todos los posibles valores que pueden tomar las variables de salida del modelo, indicando su probabilidad de ocurrencia.

En general, los pasos para utilizar un programa como el Crystal Ball son los siguientes (Ver Figura 5.9):

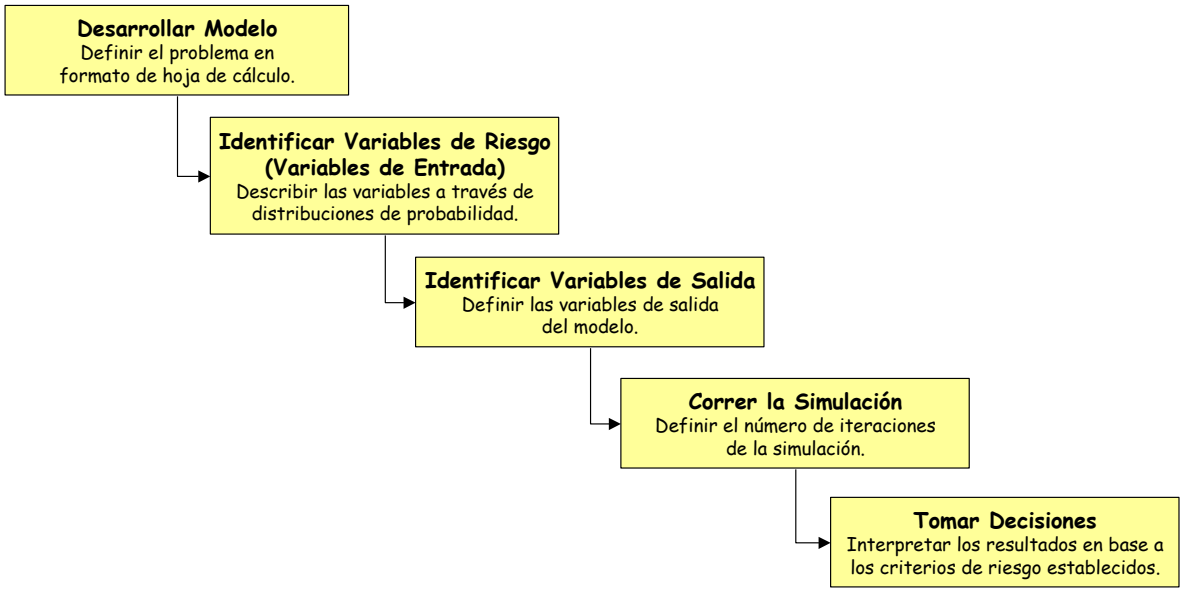


Figura 5.9: Pasos para el uso del programa Crystal Ball.

5.3.3 Aplicación en proyectos de perforación de pozos.

Con la finalidad de hacer más sencilla la explicación de la metodología de Análisis Cuantitativo de Riesgos (QRA), la misma se realizará de acuerdo al esquema mostrado anteriormente en la sección 5.3.1, describiendo al mismo tiempo el manejo del programa Crystal Ball.

Paso 1: Definición del modelo determinístico de cálculo del tiempo y costo del proyecto.

El primer paso es descomponer el proceso de perforación de un pozo en sus distintas fases operacionales, las cuales son secuenciales, tal como se describe a continuación. En este caso se utilizará como ejemplo la perforación de la sección productora de un pozo horizontal; se trata de una hoyo de 8-1/2” en el cual se debe construir ángulo para llegar a la arena objetivo inicial y de allí perforar horizontalmente con una longitud de navegación de unos 3.000 pies. También se va a correr y cementar una camisa de producción de 7” hasta la arena objetivo final. **Hay que destacar que lo importante aquí no es la descripción técnica para este caso particular, sino el entendimiento de que la metodología general requiere de la descomposición del proyecto bajo estudio en distintas fases, cualquiera que sea su naturaleza.**

1. Perforar el hoyo superficial de 17-1/2”.
2. Correr y cementar el revestidor de 13-3/8".
3. Perforar el hoyo intermedia de 12-1/4”.
4. Correr y cementar el revestidor de 9-5/8”.
5. Perforar la sección de producción de 8-1/2”
6. Correr y cementar el liner de 7”.
7. Correr la tubería de producción de 4-1/2" y equipos de completación.

Una vez hecho esto, se deben revisar las bases de datos operacionales y las experiencias previas para asociar a cada una de las fases descritas un

TIEMPO y un COSTO requerido para completar la operación, los cuales son considerados como el tiempo y costo sin la presencia de riesgos (valores promedio típicos según el tipo de pozo y el área donde se realiza la perforación). El costo de cada operación se calcula como el producto de su duración (días) y una tasa diaria combinada (US$ por día) que incluye los costos de los distintos renglones que se manejan en la estructura de costos de perforación y completación de pozos, tal como se describe en la Tabla 5.1

Tabla 5.1: Estructura básica de costos de perforación y completación de pozos.

Perforación	**Completación**
- Contrato de taladro. - Tuberías y cabezales. - Fluidos de perforación. - Registros eléctricos. - Cementación. - Equipos direccionales. - Mud logging. - Mechas. - Mudanza. - Servicios técnicos y administrativos.	- Contrato de taladro. - Cañoneo. - Tuberías y cabezales. - Servicios técnicos y administrativos.

En la Tabla 5.2 se muestran los elementos de costo y tiempo para cada fase operacional descrita previamente; estos tiempos y costos están basados en la experiencia previa de perforación de pozos en el área seleccionada. Se observa que, sin la ocurrencia de eventos de riesgo propios de las operaciones de perforación, el tiempo requerido para perforar la sección de producción de 8-1/2” es de 65 días y el costo es de 2.047.500 US$.

El modelo determinístico de cálculo de tiempo y costo a utilizar consta, entonces, de una hoja de cálculo de operaciones donde se describen las etapas de perforación de un pozo horizontal y se definen factores de tiempo y costo.

Tabla 5.2: Elementos de costo y tiempo para cada fase operacional de la perforación de un pozo horizontal.

	Descripción de las fases operacionales	Tiempo (días)	Costo (US$ por día)	Costo Total (US$)
1.	Perforar el hoyo superficial de 17-1/2".	20,0	25.000	500.000
2.	Correr y cementar el revestidor de 13-3/8".	8,0	20.000	160.000
3.	Perforar el hoyo intermedio de 12-1/4".	35,0	27.500	962.500
4.	Correr y cementar el revestidor de 9-5/8".	12,0	19.000	228.000
5.	Perforar el hoyo de producción de 8-1/2".	65,0	31.500	2.047.500
6.	Correr y cementar el liner de 7".	15,0	25.500	382.500
7.	Correr la tubería de producción de 4-1/2" y equipos de completación.	10,0	30.000	300.000
	TOTALES	165	NA	4.580.500

Paso 2: Definición de las variables de riesgo del proyecto y su comportamiento probabilístico.

El siguiente paso consiste en describir los principales factores de riesgo que pueden afectar las operaciones durante la perforación de la sección de producción, los cuales son los siguientes:

- Problemas de inestabilidad del hoyo.
- Pérdidas de circulación.
- Acumulación de ripios.
- Falla de la sarta de perforación por problemas de vibración.
- Falla de herramientas.
- Atascamiento por presión diferencial (Pega de tubería).
- Problemas con los equipos de geonavegación.

A cada uno de estos factores de riesgo que pueden presentarse durante la perforación de un pozo horizontal se les asocia un tiempo, el cual se considera como una *variable aleatoria*, representada a través de una distribución de probabilidad. Este tiempo se representa mediante una distribución triangular (valor mínimo, valor más probable y valor máximo) y se interpreta como el tiempo necesario que llevaría ejecutar las operaciones de perforación al presentarse este factor de riesgo. Como se está enfocando el estudio en la perforación de la sección de producción, al resto de las fases operaciones también se le asocia un

tiempo de operación con distribución triangular, que implícitamente ya considera la posibilidad de ocurrencia de alguno u otros factores de riesgo, como los anteriormente mencionados, pero los cálculos solamente se realizan para la perforación de la sección de producción.

En la Tabla 5.3, se muestra el modelo de tiempo y costo, incluyendo estos factores de riesgos para la perforación de la sección de 8-1/2", con la descripción del comportamiento probabilístico de las variables anteriormente mencionadas.

Los valores numéricos escogidos provienen del análisis estadístico de los datos de tiempos operacionales en pozos similares dentro de la misma área donde se perforará el pozo bajo estudio, así como también el juicio experto del personal de Ingeniería de Perforación de PDVSA.

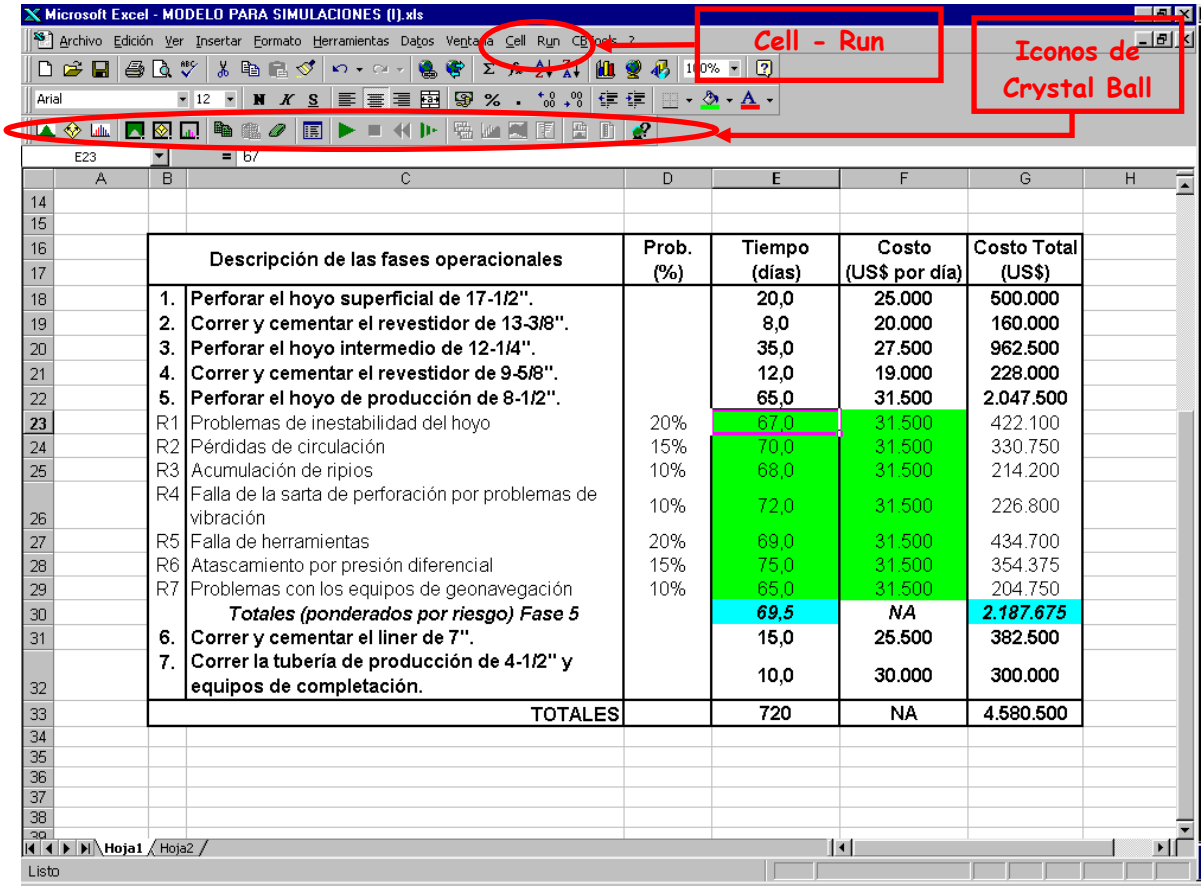
Tabla 5.3: Modelo de tiempo y costo para la perforación de un pozo horizontal.

	Descripción de las operaciones	Prob. (%)	Tiempo (días)				Tasa diaria (US$ por día)			Costo Total (US$)
			mín.	medio	máx.	promedio	mín.	máx.	promedio	
1.	**Perforar el hoyo superficial de 17-1/2".**		**16,0**	**20,0**	**26,0**	**20,7**	**20.000**	**30.000**	**25.000**	**516.667**
2.	**Correr y cementar el revestidor de 13-3/8".**		**6,0**	**8,0**	**12,0**	**8,7**	**18.000**	**22.000**	**20.000**	**173.333**
3.	**Perforar el hoyo intermedio de 12-1/4".**		**30,0**	**35,0**	**45,0**	**36,7**	**23.000**	**32.000**	**27.500**	**1.008.333**
4.	**Correr y cementar el revestidor de 9-5/8".**		**10,0**	**12,0**	**17,0**	**13,0**	**16.000**	**22.000**	**19.000**	**247.000**
5.	**Perforar el hoyo de producción de 8-1/2".**		**66,0**	**69,5**	**74,9**	**70,1**	**28.000**	**35.000**	**31.500**	**2.208.675**
	Problemas de inestabilidad del hoyo	20%	65,0	67,0	72,0	68,0	28.000	35.000	31.500	2.142.000
	Pérdidas de circulación	15%	67,0	70,0	75,0	70,7	28.000	35.000	31.500	2.226.000
	Acumulación de ripios	10%	64,0	68,0	74,0	68,7	28.000	35.000	31.500	2.163.000
	Falla de la sarta de perforación por problemas de vibración	10%	65,0	72,0	77,0	71,3	28.000	35.000	31.500	2.247.000
	Falla de herramientas	20%	67,0	69,0	74,0	70,0	28.000	35.000	31.500	2.205.000
	Atascamiento por presión diferencial	15%	69,0	75,0	83,0	75,7	28.000	35.000	31.500	2.383.500
	Problemas con los equipos de geonavegación	10%	63,0	65,0	69,0	65,7	28.000	35.000	31.500	2.068.500
6.	**Correr y cementar el liner de 7".**		**13,0**	**15,0**	**19,0**	**15,7**	**23.000**	**28.000**	**25.500**	**399.500**
7.	**Correr la tubería de producción de 4-1/2" y equipos de completación.**		**8,0**	**10,0**	**14,0**	**10,7**	**26.000**	**34.000**	**30.000**	**320.000**
	Totales		**149,0**	**169,5**	**207,9**	**175,5**	**154.000**	**203.000**	**178.500**	**4.873.508**

Para la determinación del tiempo de operación mínimo, medio y máximo de la sección de producción de 8-1/2", se calcula un promedio ponderado en función de la probabilidad de ocurrencia de cada uno de los eventos de riesgo y el tiempo correspondiente. Por ejemplo, el tiempo mínimo (66,0 días) se calcula de la siguiente manera: (0,2)(65,0) + (0,15)(67,0) + … + (0,10)(63,0) = 66,0 días. De igual modo se procede con el costo total para la perforación de esta sección.

Paso 3: Aplicación de la simulación de Monte Carlo.

Si el programa Crystal Ball ha sido instalado adecuadamente, puede activarse desde el menú Herramientas de MS Excel. En la Figura 5.10 se muestra la pantalla principal de MS Excel una vez que Crystal Ball está activo; se observan dos nuevos elementos en la barrá del menú principal: ***Cell*** y ***Run***. Además se activa una barra de íconos propia de Crystal Ball justo por encima de la hoja de cálculo.



	Descripción de las fases operacionales	Prob. (%)	Tiempo (días)	Costo (US$ por día)	Costo Total (US$)
1.	**Perforar el hoyo superficial de 17-1/2".**		20,0	25.000	500.000
2.	**Correr y cementar el revestidor de 13-3/8".**		8,0	20.000	160.000
3.	**Perforar el hoyo intermedio de 12-1/4".**		35,0	27.500	962.500
4.	**Correr y cementar el revestidor de 9-5/8".**		12,0	19.000	228.000
5.	**Perforar el hoyo de producción de 8-1/2".**		65,0	31.500	2.047.500
R1	Problemas de inestabilidad del hoyo	20%	67,0	31.500	422.100
R2	Pérdidas de circulación	15%	70,0	31.500	330.750
R3	Acumulación de ripios	10%	68,0	31.500	214.200
R4	Falla de la sarta de perforación por problemas de vibración	10%	72,0	31.500	226.800
R5	Falla de herramientas	20%	69,0	31.500	434.700
R6	Atascamiento por presión diferencial	15%	75,0	31.500	354.375
R7	Problemas con los equipos de geonavegación	10%	65,0	31.500	204.750
	Totales (ponderados por riesgo) Fase 5		***69,5***	***NA***	***2.187.675***
6.	**Correr y cementar el liner de 7".**		15,0	25.500	382.500
7.	**Correr la tubería de producción de 4-1/2" y equipos de completación.**		10,0	30.000	300.000
	TOTALES		720	NA	4.580.500

Figura 5.10: Modelo de tiempo y costo para la perforación de un pozo horizontal. (Ventana de Crystal Ball)

El primer paso al utilizar el programa Crystal Ball es definir la distribución de probabilidad para cada una de las variables de entrada del modelo; las celdas en el modelo de la hoja de cálculo que corresponden a estas variables se denominan *celdas suposición* ("assumption cells"). Se selecciona cada una de estas celdas,

que para el modelo definido corresponden a los tiempos de operación de cada una de las fases del proceso de perforación de un pozo horizontal al presentarse los eventos de riesgo indicados.

Del menú principal ***Cell*** se escoje ***Define Assumption***, así Crystal Ball despliega una galería de distribuciones de probabilidad a partir de la cual se puede definir el comportamiento probabilístico de las variables de interés en el modelo. Por ejemplo, si se quiere definir la distribución de probabilidad para el tiempo de operación asociado al evento de riesgo R1: Problemas de inestabilidad del hoyo, primero se selecciona la celda E23; luego del menú ***Cell***, la opción ***Define Assumption***. Crystal Ball despliega la galería de distribuciones que se muestra en la Figura 5.11. Se ha supuesto que esta variable tiene una distribución triangular, así que se hace click sobre el botón que representa a este tipo de distribución y luego OK; se despliega una ventana de diálogo en la cual se deben establecer los parámetros que definen a esta distribución triangular (valor mínimo, más probable y máximo).

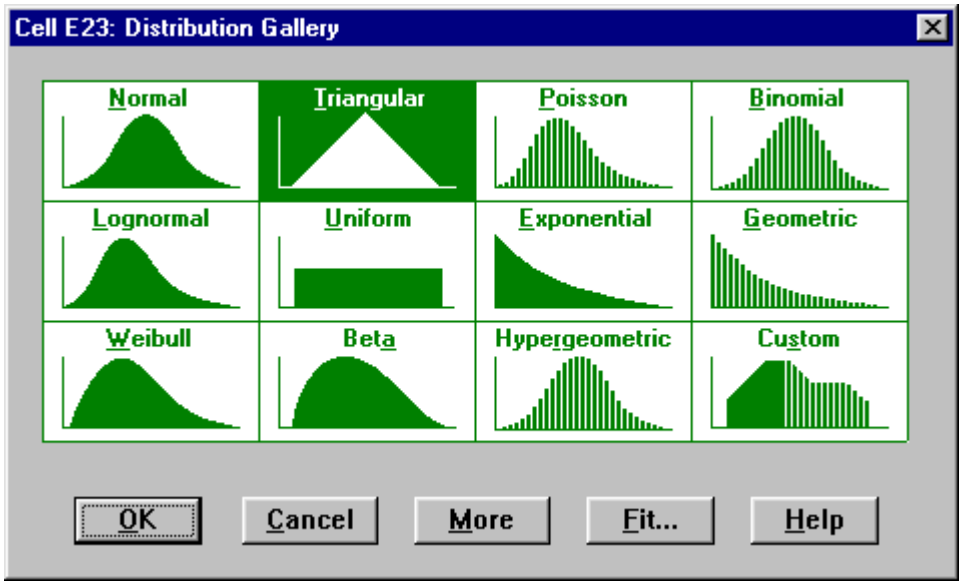


Figura 5.11: Galería de distribuciones de probabilidad disponibles en Crystal Ball.

El resultado para este ejemplo se muestra en la Figura 5.12.

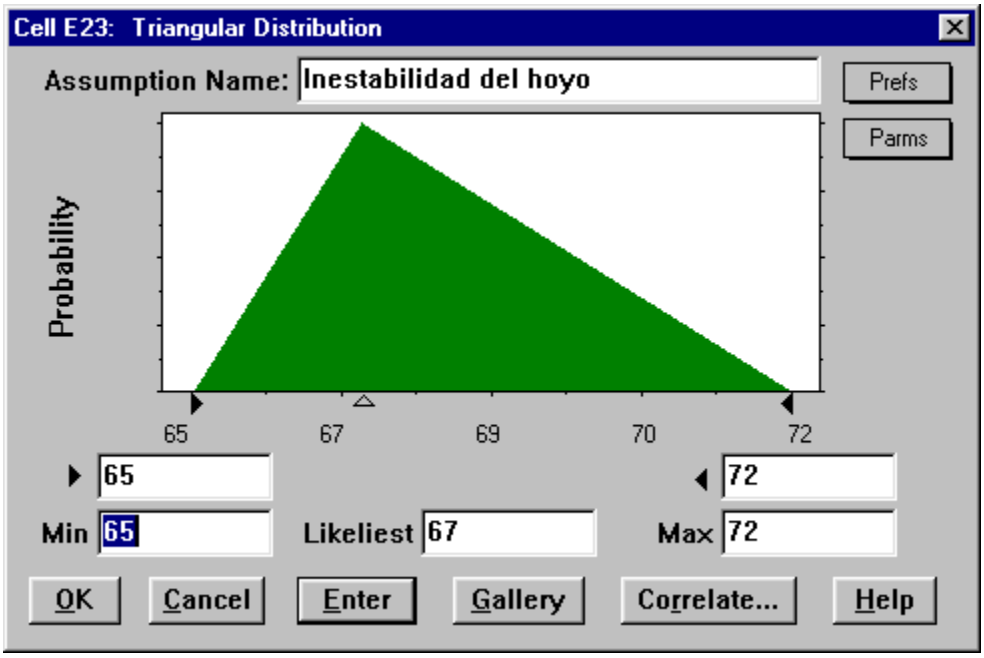


Figura 5.12: Ventana de diálogo para la definición de la distribución de probabilidad del evento de riesgo R1 (Celda G23).

Este procedimiento debe repetirse para cada una de las variables aleatorias del modelo. Una vez hecho esto, se deben definir una o más *celdas pronóstico* ("forecast cells") que representan a las variables de salida del modelo. Para el caso bajo estudio, estas variables son el tiempo y el costo de las operaciones de perforación del hoyo de producción que corresponden a las celdas E30 y G30 respectivamente (Veáse la Figura 5.10). Se hace click sobre la celda E30 y luego se selecciona la opción ***Define Forecast*** del menú ***Cell***; entonces se despliega la ventana de diálogo mostrada en la Figura 5.13. En esta ventana si se selecciona la opción ***Show While Running***, puede verse cómo se construye la distribución de la variable de salida a medida que el programa Crystal Ball realiza la simulación de Monte Carlo.

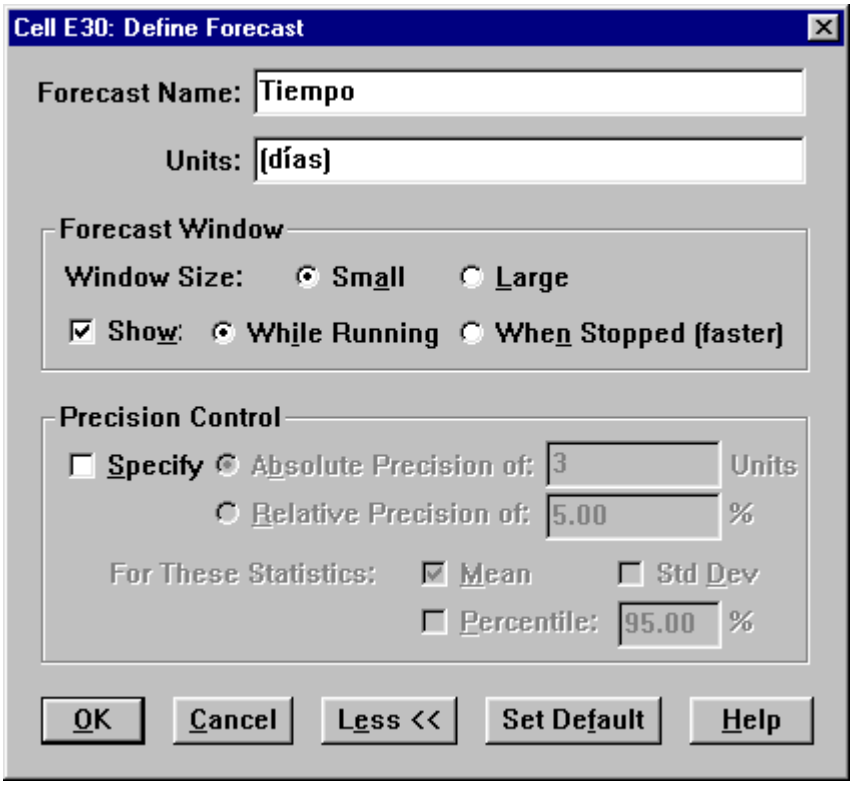


Figura 5.13: Ventana de diálogo para la definición de las celdas pronóstico.

El próximo paso es definir los parámetros para correr la simulación, para lo cual se usa la opción ***Run Preferences*** del menú ***Run***; la ventana de diálogo mostrada en la Figura 5.14 permite escoger el número de iteraciones a realizar y otras opciones con respecto al proceso de generación de números aleatorios a partir de los cuales comienza la simulación. En este caso se escogen 10.000 iteraciones.

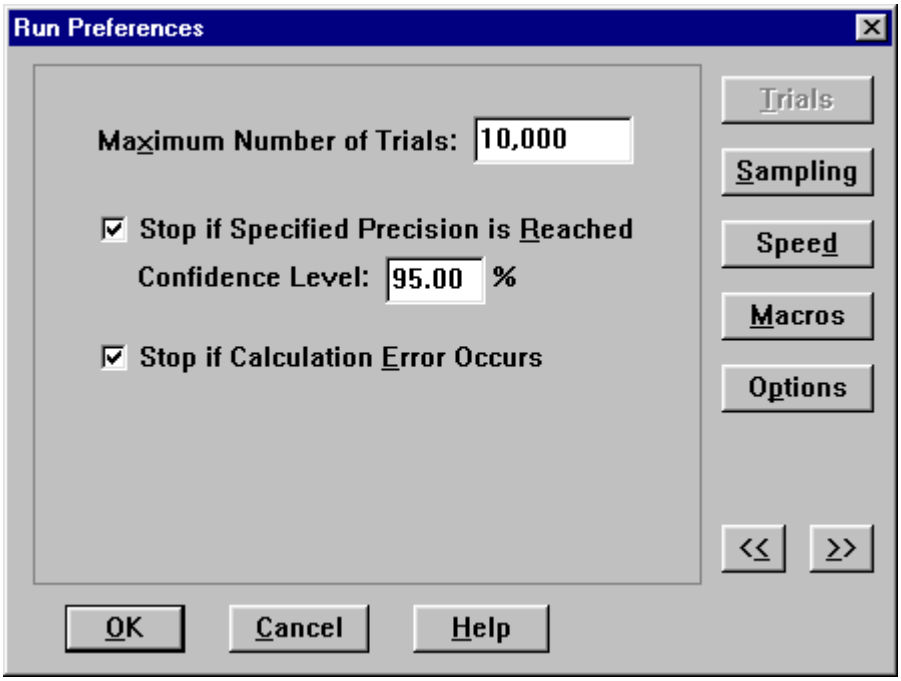


Figura 5.14: Ventana de diálogo de la opción **Run Preferences**.

Finalmente se debe correr la simulación de Monte Carlo, para lo cual se selecciona la opción ***Run*** del menú ***Run***. Este menú también tiene opciones tales como detener una simulación en progreso, continuar y limpiar valores de celdas, lo cual es necesario si desea volver a correr la simulación.

Paso 4: Proyección de la curva de distribución del tiempo y costo de la fase del proyecto bajo estudio y su nivel de certidumbre

Los principales reportes de salida que se obtienen del programa Crystal Ball son los siguientes: *histograma de frecuencias* ("frequency chart"), *resumen de percentiles y resumen de estadísticos descriptivos básicos*.

La Figura 5.15 muestra el histograma de frecuencias para el Tiempo de Operación de la Fase 5 (Perforación del hoyo de producción) del proyecto después de 10.000 iteraciones. Desde el punto de vista estadístico, este histograma incluye todos los valores de este indicador dentro de 2,6 desviaciones estándar de la media ($\mu \pm 2{,}6\sigma$), lo que representa aproximadamente 99% de los

datos. El número de datos fuera de este rango se muestra en la parte superior de la figura; en este caso se tienen 96 datos que no caen dentro de este intervalo.

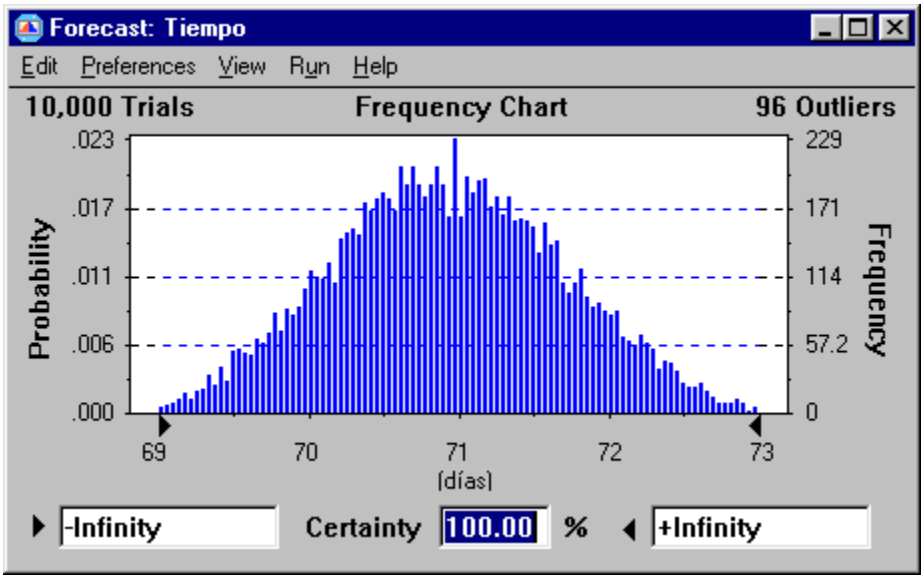


Figura 5.15: Histograma de frecuencias para el Tiempo de Operación de la Fase 5

De manera similar, la Figura 5.16 también muestra el histograma de frecuencias para el Costo de la Fase 5 después de 10.000 iteraciones; en este caso existen 5 datos que caen fuera del intervalo de confianza del 99%.

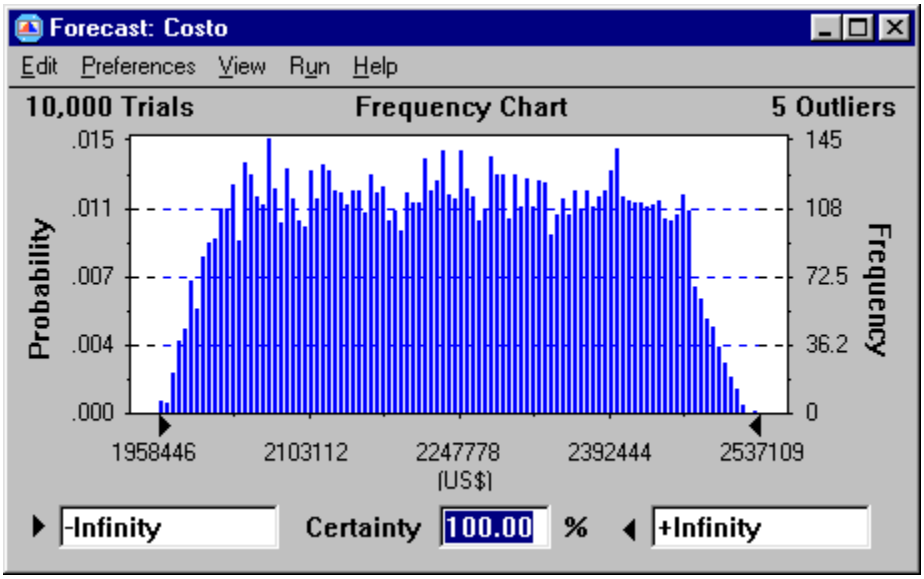


Figura 5.16: Histograma de frecuencias para el Costo de la Fase 5.

En la Figura 5.15 se pueden observar dos triángulos pequeños de color negro justo por debajo del eje horizontal, los cuales se denominan *apuntadores* (“grabbers”) y se pueden mover de derecha a izquierda para modificar la distribución de probabilidades de la variable de salida una vez corrida la simulación de Monte Carlo. El rango de valores de esta variable para las posiciones de los apuntadores se presenta en los campos inferiores de la figura (véanse los campos -Infinito a +Infinito). Así mismo, el porcentaje de valores entre los dos apuntadores se muestra en el campo *Certidumbre* (“Certainty”) de la misma figura.

Al mover los apuntadores, la distribución fuera del rango especificado cambia de color y el valor correspondiente a este apuntador también cambia para reflejar su posición actual. La Figura 5.17 muestra los resultados de mover el apuntador izquierdo al valor 70 días, la porción más oscura del histograma representa 88,17% de la distribución, tal como se indica en el campo *Certidumbre*.

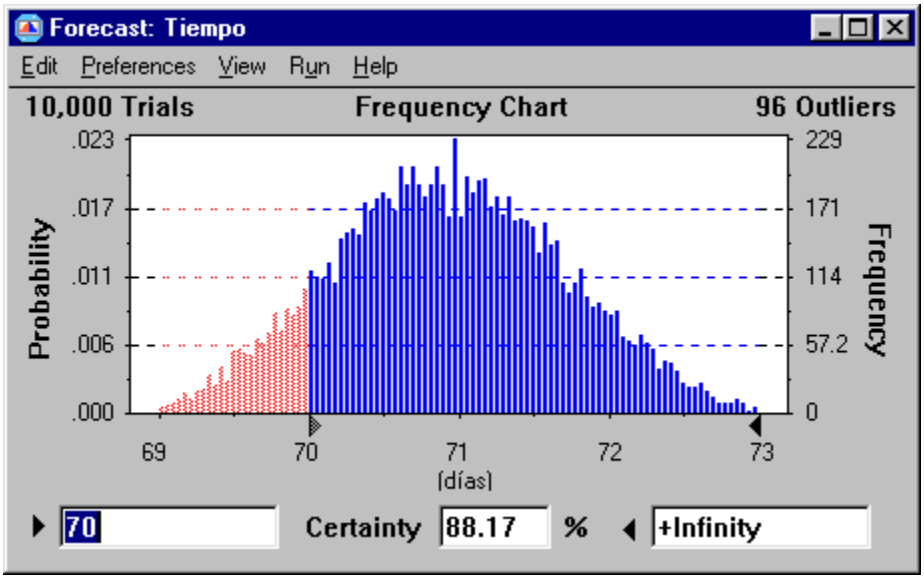


Figura 5.17: Movimiento del apuntador izquierdo en el histograma de frecuencias.

También se pueden especificar valores, tal como se muestra en la Figura 5.18. Al hacer esto, los apuntadores se mueven automáticamente a las posiciones apropiadas y el nivel de certidumbre cambia para indicar el nuevo porcentaje de

datos que caen dentro del rango especificado. En el caso de la Figura 5.18 se observa que para valores del Tiempo de Operación de la Fase 5 del proyecto comprendidos entre 70 y 72 días existe un nivel de certidumbre del 78,74%.

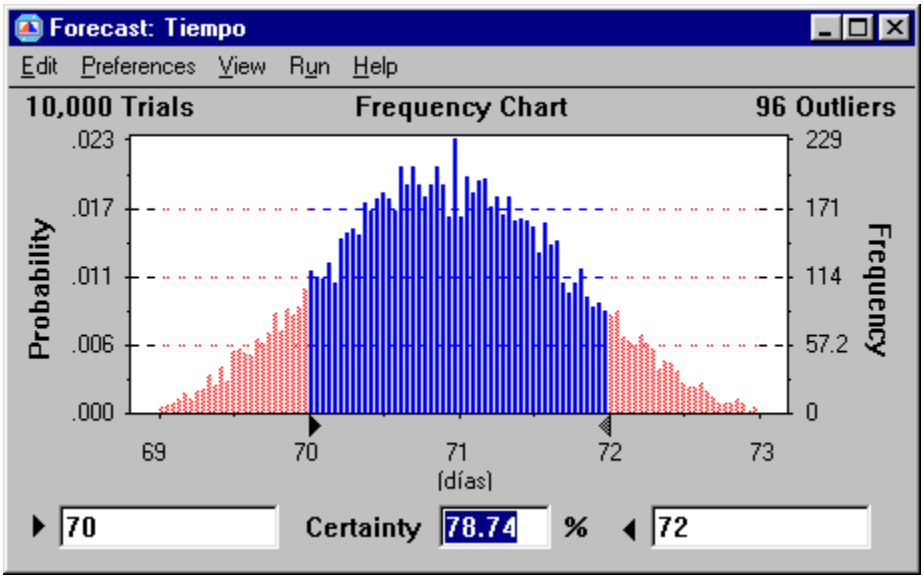


Figura 5.18: Certidumbre para un rango de valores específico.

Un punto adicional que es importante destacar al interpretar los resultados que se obtienen de una simulación de Monte Carlo es el uso de los *percentiles*. La Figura 5.19 muestra un diagrama de percentiles para la distribución de probabilidad del Tiempo de Operación de la Fase 5.

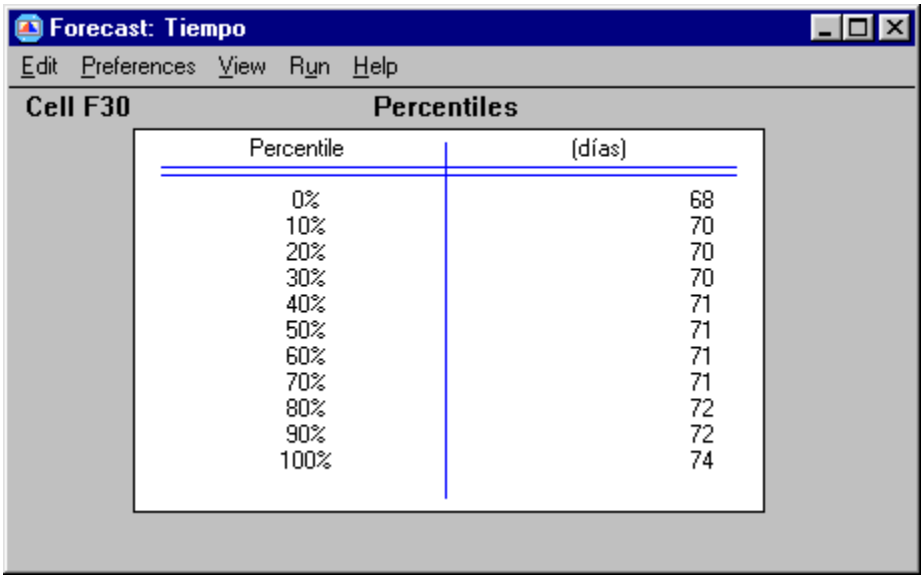


Figura 5.19: Diagrama de percentiles para la distribución del Tiempo de Operación de la Fase 5.

Usualmente se utilizan para los análisis de los resultados, los percentiles 10%, 50% y 90% que se denotan como P10, P50 y P90. Por ejemplo, *el percentil P10 es 70 días y significa que existe un 10% de probabilidad de que el Tiempo de Operación sea menor o igual a ese valor.*

En el caso del Costo de la Fase 5, la Figura 5.20 muestra el diagrama de percentiles para su distribución de probabilidad.

Los histogramas de frecuencia también pueden representarse en forma de *distribución acumulada*; las Figura 5.21 y 5.22 muestran la distribución acumulada para el Tiempo de Operación y el Costo de la Fase 5.

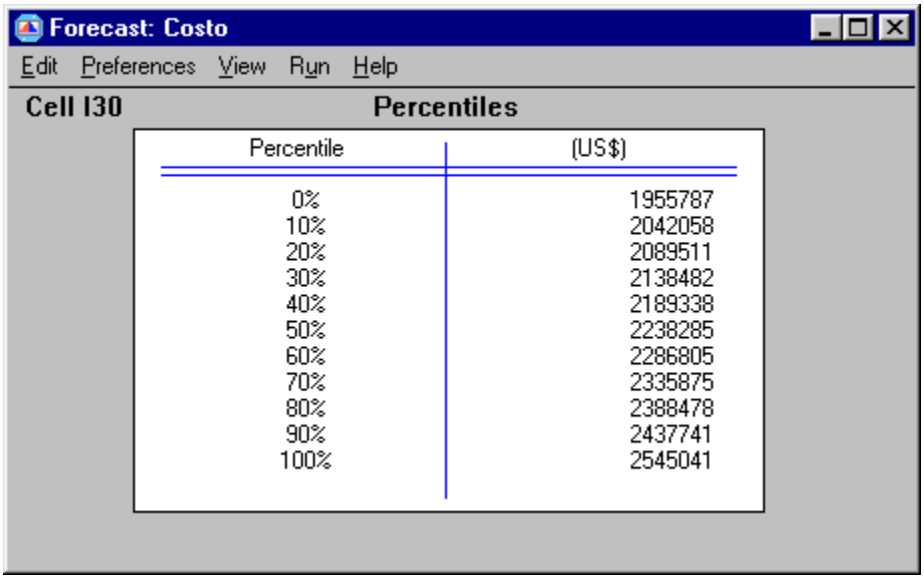


Figura 5.20: Diagrama de percentiles para la distribución del Costo de la Fase 5.

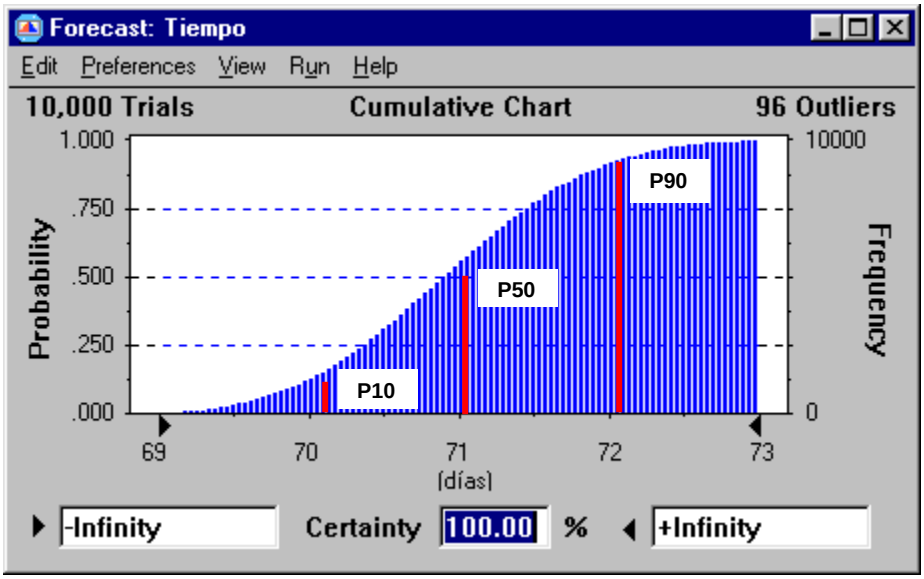


Figura 5.21: Distribución acumulada para el Tiempo de Operación de la Fase 5.

Esta distribución acumulada se puede expresar como una función F(x) definida de la siguiente manera: $F(x) = P(\text{Tiempo} \leq x)$; es decir, la probabilidad de que el Tiempo sea menor o igual que x, donde x representa los distintos valores que puede tomar el Tiempo dentro del rango especificado (69 a 73 días). Usualmente se representan los percentiles P10, P50 y P90 sobre esta gráfica, tal como se muestra en la Figura 5.21, para expresar los niveles de certidumbre de la

variable de interés, en este caso el Tiempo de Operación. Una interpretación similar se aplica para el caso de la distribución acumulada del Costo Total.

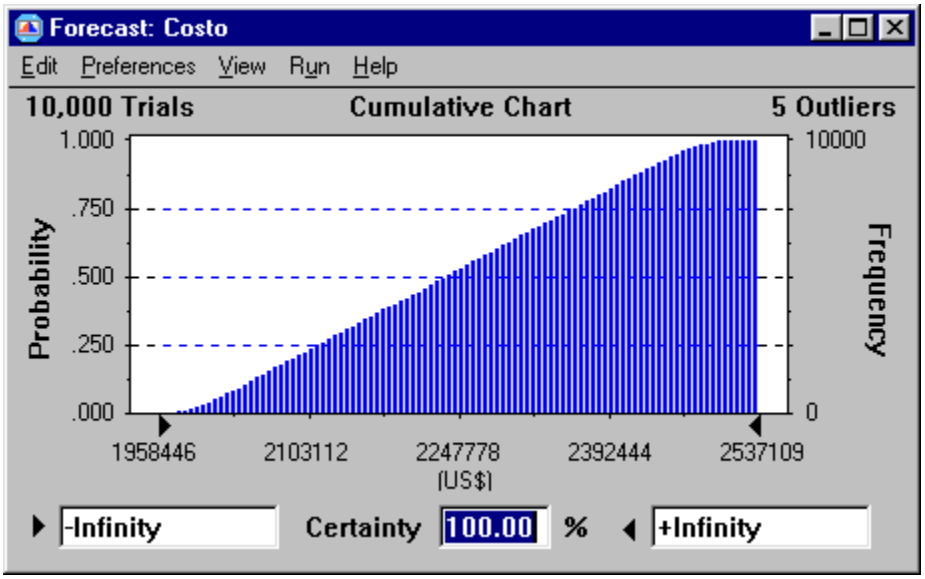
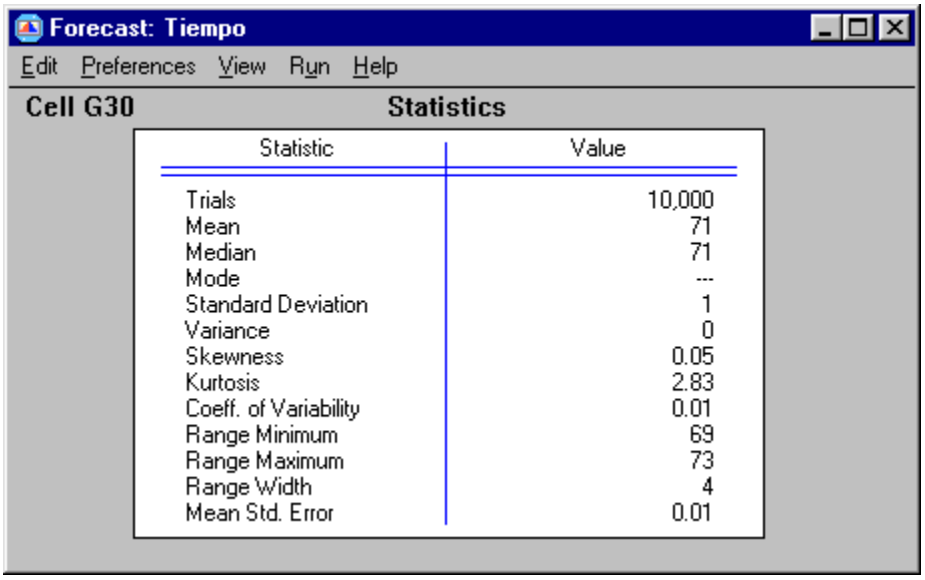


Figura 5.22: Distribución acumulada para el Costo de la Fase 5.

El programa Crystal Ball también genera reportes de estadísticos descriptivos básicos para cada una de las distribuciones de probabilidad de la variable pronóstico, tal como se muestra en la Figura 5.23 y 5.24



Statistic	Value
Trials	10,000
Mean	71
Median	71
Mode	---
Standard Deviation	1
Variance	0
Skewness	0.05
Kurtosis	2.83
Coeff. of Variability	0.01
Range Minimum	69
Range Maximum	73
Range Width	4
Mean Std. Error	0.01

Figura 5.23: Estadísticos básicos para el Tiempo de Operación de la Fase 5.

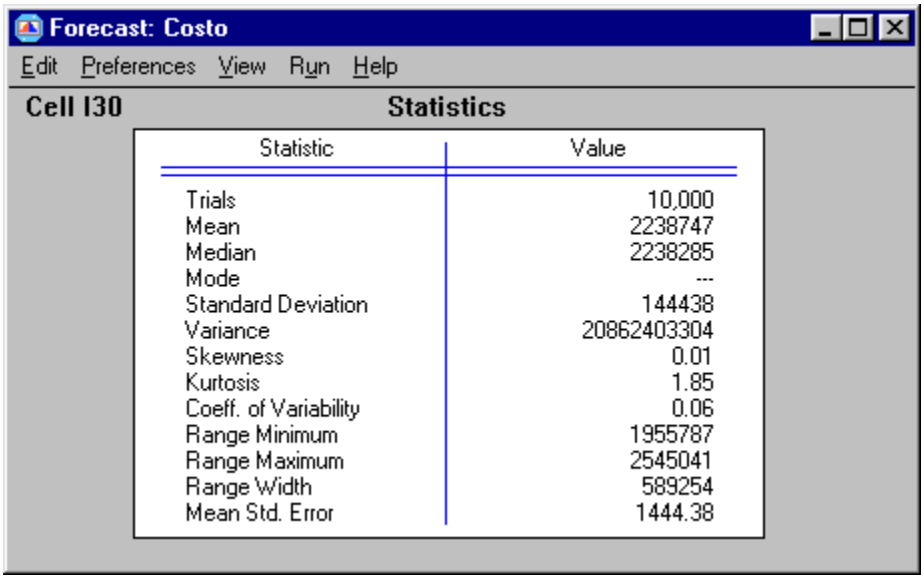


Figura 5.24: Estadísticos básicos para el Costo de la Fase 5.

A partir de todos los gráficos y reportes presentados anteriormente, es posible observar el impacto de las variables de riesgo, consideradas en forma conjunta, sobre el tiempo y el costo. La Tabla 5.4 permite comparar los indicadores del caso base versus los valores esperados obtenidos al aplicar la simulación de Monte Carlo.

Tabla 5.4: Comparación de valores caso base vs. simulación de Monte Carlo.

Escenario	**Tiempo (días)**	**Costo (US$)**
Caso Base (Determinístico)	65,0	2.047.500
Simulación (Probabilístico)	71,0	2.238.747
Variación Absoluta	6,0	191.247
Variación Porcentual	**9,23 %**	**9,34 %**

En la Tabla 5.4, se observa que el valor esperado del Tiempo de Operación cuando se consideran todas las variables de riesgo es de 71 días, lo cual representa aproximadamente un 9% más del valor obtenido en el caso base de 65 días (modelo determinístico). Por otro lado, el valor resultante para el Costo

muestra un aumento de 9,34%. Estos resultados señalan que los valores esperados para los indicadores de tiempo y costo, cuando son calculados considerando la variación en forma conjunta de todos los parámetros de riesgo, presentan una variación importante con respecto al caso base. Esto permite afirmar que en caso de presentarse uno o varios de los eventos de riesgo definidos, el impacto en el tiempo y costo es significativo para el proyecto.

5.3.4 Análisis de sensibilidad

La incertidumbre en la(s) variable(s) pronóstico en un modelo es el resultado del efecto conjunto de las incertidumbres de todas las variables de entrada (suposición) de ese modelo, así como las fórmulas y ecuaciones utilizadas. Una variable de entrada (suposición) puede tener un alto grado de incertidumbre, y aún así tener poco efecto sobre la(s) variable(s) pronóstico porque no se ha ponderado con un porcentaje representativo en las ecuaciones del modelo. Por otro lado, pueden existir variables de entrada (suposición) con un grado de incertidumbre relativamente bajo e influenciar enormemente a la(s) variable(s) pronóstico. El *análisis de sensibilidad* permite determinar el nivel de incertidumbre en una variable pronóstico de un modelo, causado por la incertidumbre de las variables de entrada (suposición) así como el modelo mismo.

El *diagrama de sensibilidad* (“Sensitivity Chart”) o *gráfico Tornado*, puede generarse fácilmente con el programa Crystal Ball, permitiendo determinar la influencia que cada celda de suposición (“assumption cell”) tiene sobre la(s) celda(s) pronóstico (“forecast cell”). Para crear un diagrama de sensibilidad, hay que asegurarse de seleccionar la opción *Sensitivity Analysis* en la ventana de diálogo *Run Preferences* antes de correr la simulación de Monte Carlo. Una vez que la simulación ha terminado, se escoge la opción *Open Sensitivity Chart* del menú *Run*. Las variables de entrada se muestran en la parte izquierda del diagrama, comenzando por aquélla que presenta mayor sensibilidad. Para el caso bajo estudio, se trata de establecer el impacto que los factores de riesgo que

pueden presentarse durante la perforación del hoyo de producción tienen sobre el tiempo y el costo de esta fase del proyecto; la Figura 5.25 muestra el diagrama de sensibilidad para el Tiempo de Operación de la Fase 5 (Perforación del hoyo de producción).

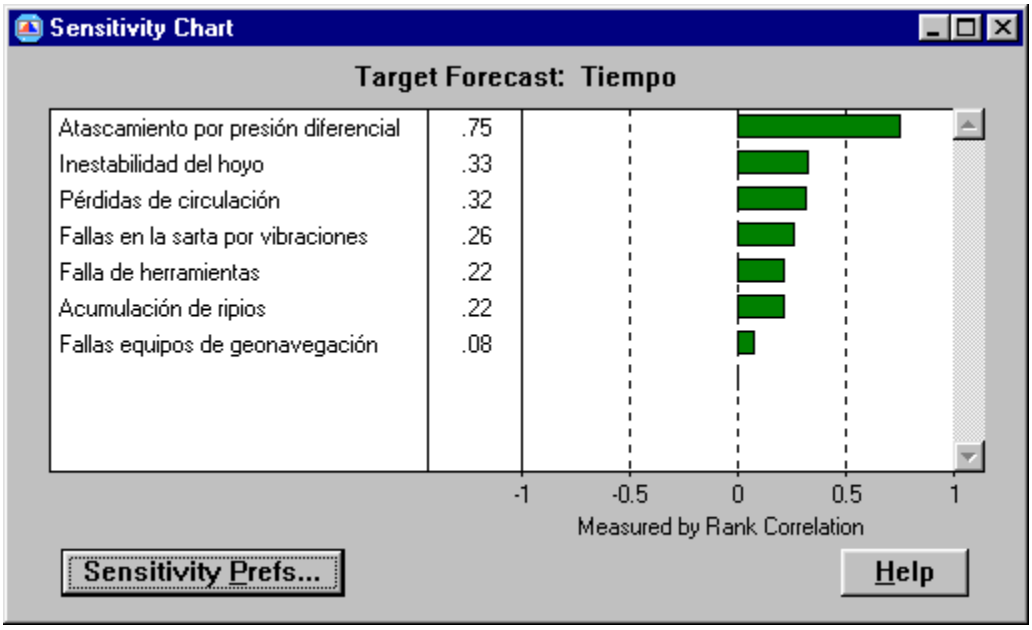


Figura 5.25: Diagrama de sensibilidad para el Tiempo de Operación de la Fase 5.

De esta figura se puede concluir que el *atascamiento por presión diferencial, la inestabilidad del hoyo, las pérdidas de circulación y la falla de la sarta por vibraciones* son los eventos de riesgo que tienen mayor impacto sobre tiempo de operación para la perforación del hoyo de producción.

Este tipo de análisis permite detectar cuáles son las operaciones que presentan mayor riesgo, y por lo tanto el potencial de incrementar los tiempos y costos globales del proyecto. De esta manera, los planes de contingencia que se diseñen durante la etapa de planificación del proyecto (respuestas a preguntas del tipo ¿qué pasa si…?) deberán hacer mayor énfasis en plantear alternativas de solución a los eventos de riesgo mencionados, en caso de que ocurran al realizar las operaciones normales de perforación a nivel de campo.

Las sensibilidades de las figuras anteriores están medidas basándose en el coeficiente de correlación. Los valores positivos de este coeficiente indican que un aumento en la variable de entrada se asocia con un aumento de la variable pronóstico (Tiempo de Operación), mientras que los valores negativos indican que un aumento de la primera se traduce en una disminución de la segunda. Además mientras el coeficiente de correlación se acerca más a 1,0 significa que mayor es la relación de dependencia entre ambas variables. También se puede expresar el diagrama de sensibilidad como un porcentaje de la contribución a la varianza de cada una de las variables de entrada. Para ello hay que seleccionar esta opción dentro de la ventana de diálogo **Run Preferences – Options**, tal como se muestra en la Figura 5.26. La Figura 5.27 muestra el diagrama de sensibilidad para el tiempo de operación, jerarquizando las variables de entrada por su contribución a la varianza.

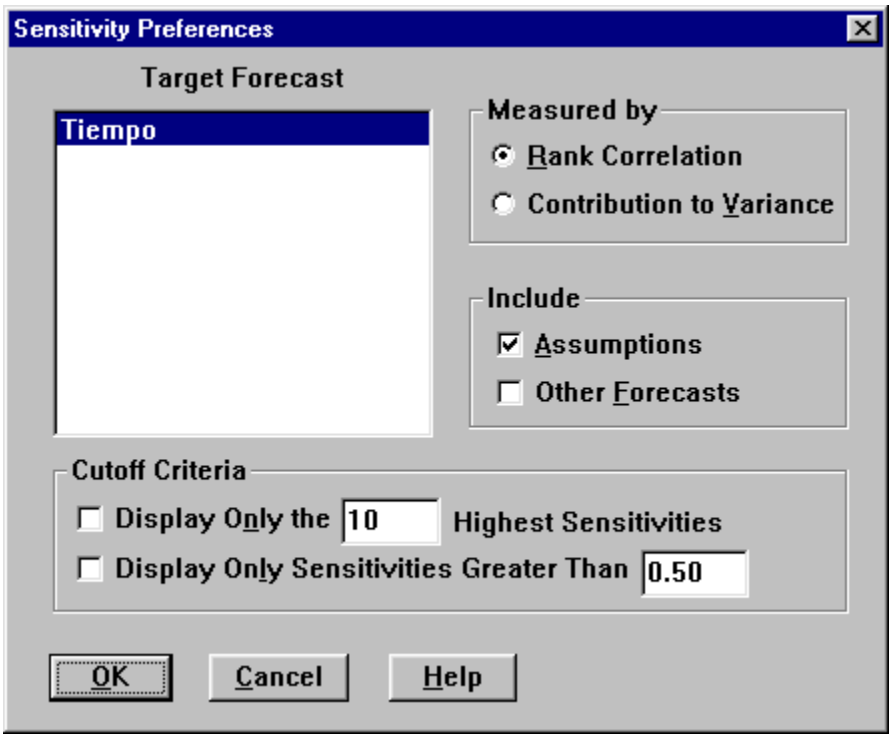


Figura 5.26: Opciones disponibles en Crystal Ball para los diagramas de sensibilidad.

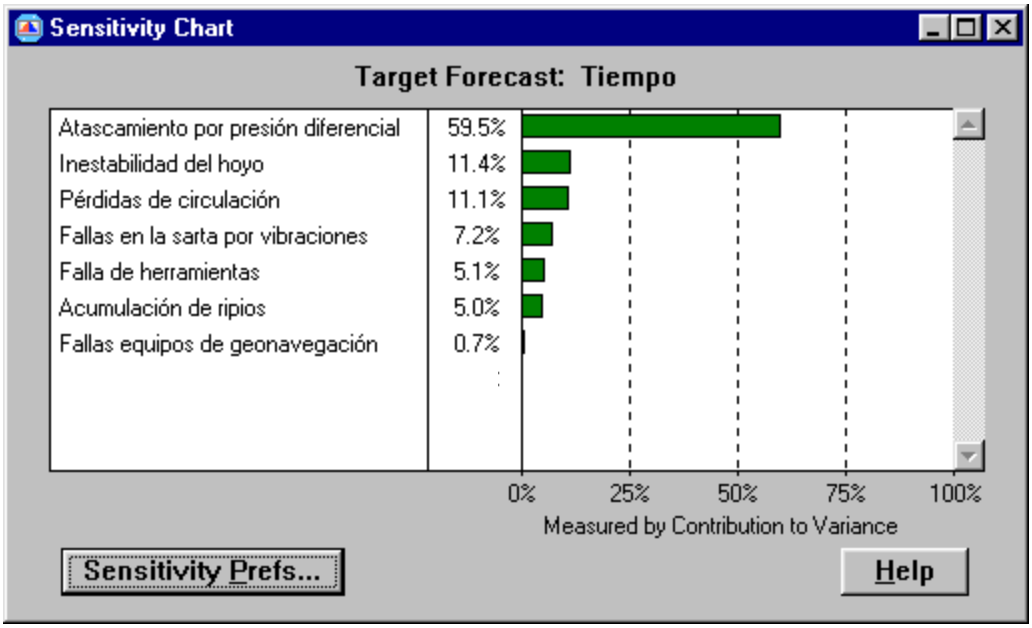


Figura 5.27: Diagrama de sensibilidad para el Tiempo de Operación (jerarquizado por contribución a la varianza).

Nuevamente en esta figura se confirma lo que ya se explicó para el diagrama de sensibilidad de la Figura 5.25. El atascamiento por presión diferencial, la inestabilidad del hoyo, las pérdidas de circulación y las fallas en la sarta por vibraciones son los eventos de riesgo que tienen mayor impacto sobre la variabilidad que presenta el tiempo de operación durante la perforación del hoyo de producción.

Finalmente, como ya se ha mencionado a lo largo del trabajo, hay que enfatizar que este tipo de análisis se realiza durante la etapa de planificación del proyecto de perforación, como una herramienta que permite identificar y cuantificar el impacto de los riesgos potenciales que pueden presentarse durante la ejecución del proyecto. Ahora bien, los datos de alta calidad obtenidos durante la perforación y el análisis de los mismos resultan de vital importancia, y más valioso es aún cuando se utilizan estos datos en forma coherente para apoyar decisiones tomadas durante el proceso de perforación.

Los ingenieros e investigadores buscan formas de perfeccionar este proceso de toma de decisiones mediante una mayor y más rápida disponibilidad de los datos en tiempo real y el uso de conocimientos obtenidos en otras áreas. Por ejemplo, se están desarrollando nuevas técnicas para estimar el riesgo de un incidente de perforación, tal como el atascamiento de la sarta de perforación. Utilizando los datos de presión y torque para un proyecto específico en el Mar del Norte, los científicos produjeron un perfil de riesgo de atascamiento de la sarta de perforación que comienza por predecir problemas de limpieza de hoyo (Véase la Figura. 5.28).

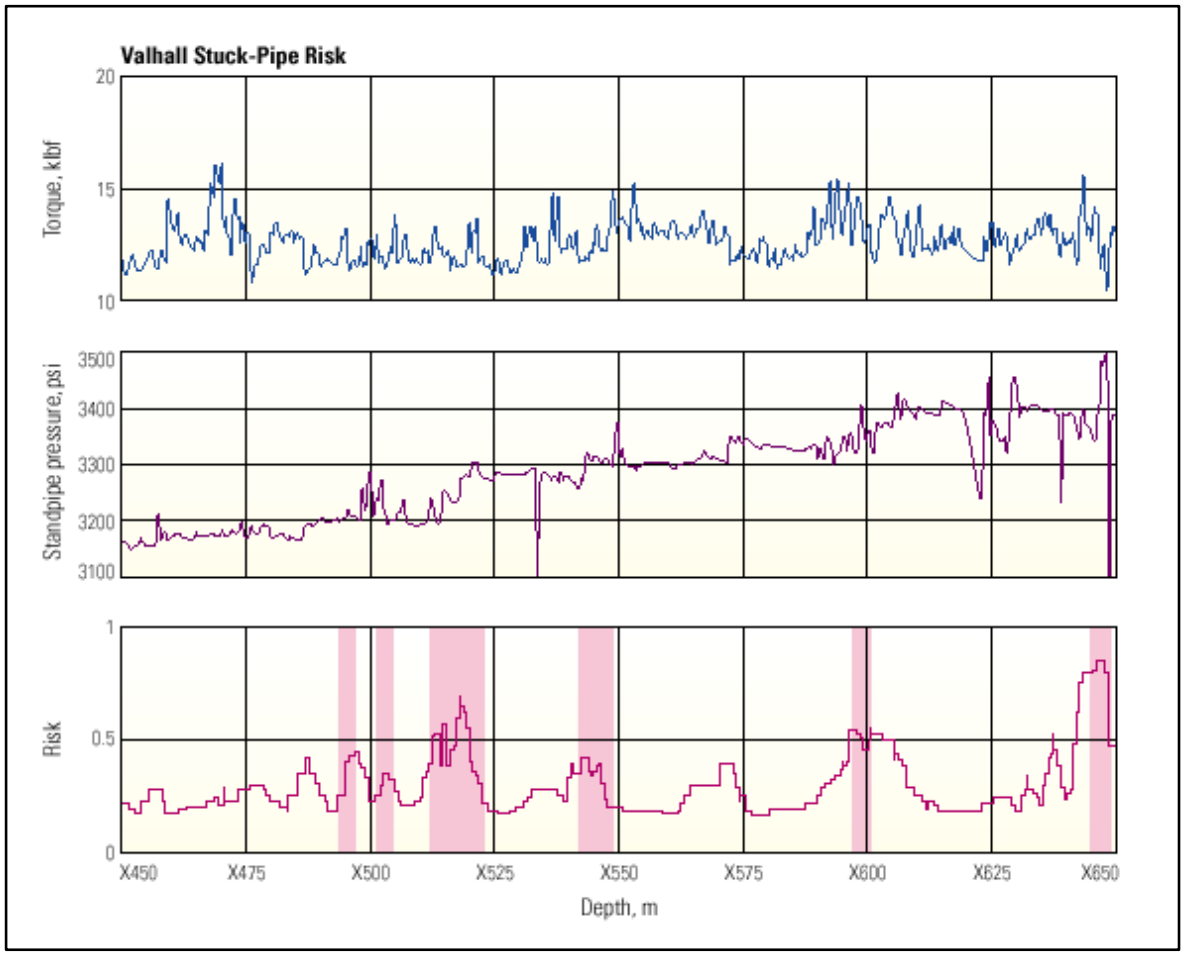


Figura 5.28: Pronóstico de posibles atascamientos de la sarta de perforación.

En esta figura se puede observar que el los datos medidos durante la perforación son dos elementos que, junto con las técnicas de procesamiento de

señal, ayudan a identificar las secciones del pozo donde el riesgo de atascamiento de la sarta de perforación es alto. Las barras de color indican el lugar donde los ingenieros de perforación experimentaron dificultades durante la perforación, en su mayor parte, relacionadas con la limpieza de hoyo.

Con posteriores ensayos y mayor experiencia, estos adelantos harán posible que las alarmas ya no señalen un evento sorprendente en el momento en que se produce, sino que tendrán la capacidad de advertir a los ingenieros de perforación mucho antes de que el problema pueda alcanzar dimensiones mayores.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El Análisis Cuantitativo de Riesgos (QRA) aplicado a las operaciones de perforación de un pozo horizontal en una sección particularmente complicada como lo es el hoyo de producción, permitió:
  - Establecer una estructura desagregada de las principales actividades, así como los tiempos y costos asociados.
  - Identificar los eventos de riesgo más importantes para las operaciones en esta sección, así como la probabilidad de ocurrencia, el tiempo y costo para cada uno de ellos.

- Al considerar el efecto conjunto de todos los eventos de riesgo definidos para la perforación de la sección de producción de un pozo horizontal, la simulación de Monte Carlo generó valores esperados (medias) de tiempo y costo que son superiores a los del caso base (modelo determinístico), lo cual permite concluir que el impacto de la ocurrencia de tales eventos durante las operaciones puede afectar significativamente el desempeño del proyecto.

- Cuando se toman en cuenta todas los eventos de riesgo definidos para la perforación del hoyo de producción, se concluye que existe un 100% de certidumbre de que el Tiempo de Operación se encuentre en un rango de 69 a 73 días (hay que hacer notar que de acuerdo a los resultados de la simulación, el Tiempo de Operación obtenido en el caso base nunca podrá alcanzarse por estar fuera de este rango). El Costo se ubicará en un rango que va de 1.958.446 a 2.537.109 US$; debe notarse que el valor de esta variable para el caso base (2.047.500 US$) sí está dentro del rango especificado, pero presenta una probabilidad baja de poder alcanzarse, tal como puede apreciarse en la curva de distribución acumulada.

- Al analizar en forma individual el efecto de cada uno de los eventos de riesgo, a través de un análisis de sensibilidad, se observa que los que tienen mayor impacto sobre el Tiempo de Operación son los siguientes:

  R6 Atascamiento por presión diferencial.
  R1 Problemas de inestabilidad del hoyo.
  R2 Pérdidas de circulación.
  R4 Fallas de la sarta por problemas de vibración.

  Este tipo de análisis permite detectar cuáles son las operaciones que presentan mayor riesgo, y por lo tanto el potencial de incrementar los tiempos y costos globales del proyecto. De esta manera, los planes de contingencia que se diseñen durante la etapa de planificación del proyecto (respuestas a preguntas del tipo ¿qué pasa si…?) deberán hacer mayor énfasis en plantear alternativas de solución a los eventos de riesgo mencionados, en caso de que se presenten durante las operaciones normales de perforación a nivel de campo.

- El Análisis Cuantitativo de Riesgos es una de las técnicas más sofisticadas disponibles para pronosticar los riesgos de eventos no deseados y para establecer los medios adecuados para minimizarlos. Sin embargo, a pesar de utilizar métodos estadísticos, es una técnica que depende en gran medida del juicio experto de quien toma las decisiones y sus resultados pueden tener un alto grado de incertidumbre. Es importante destacar que no debe ser la única herramienta metodológica utilizada en la toma de decisiones, sino que también deben emplearse otras técnicas basadas en la experiencia y juicio experto al momento de tomar una decisión definitiva.

- Los fundamentos más importantes del Análisis Cuantitativo de Riesgos pueden resumirse de la siguiente manera:

- Conocer suficiente acerca del análisis propuesto para aislar las variables clave. Se deben reunir datos, para poder establecer cuanto se conoce y cuanto no.

- Aislar las variables clave. Puede ocurrir que no se tiene mucho conocimiento sobre estas variables hasta no haber transitado por el problema con detalle y corrido algunas sensibilidades. Después de aislar las variables clave, se debe encontrar la manera para cuantificarlas; deben tomarse en cuenta aspectos positivos y negativos. La creación de buenas bases de datos con información de los proyectos es algo indispensable para realizar estos análisis estadísticos.
- Otra consideración fundamental envuelta en el análisis de riesgo es la visión particular de la incertidumbre. Muchos parámetros tienen posibilidades de estar por encima o por debajo del valor más probable, por lo que la visión de un parámetro debe reflejar ambas situaciones; un ejemplo de ello es la distribución triangular.
- Asegurarse de que el concepto de incertidumbre esta siendo considerado a nivel de cada variable y no a nivel de la respuesta final.
- Otro fundamento del análisis de riesgo envuelve entender el modelo. Si el modelo es una simple ecuación se pueden comprender rápidamente sus efectos por sus datos de entrada. Si es una ecuación compleja, no se tiene definida o no se entienden sus algoritmos, entonces se debe probar el modelo independientemente. Para ello, hay que sustituir los datos, uno por vez, formando un rango de casos y analizándolos hasta que se entiendan los efectos en los resultados del cambio en las condiciones de entrada.
- Uno de los fundamentos más importantes es estimar la probabilidad de ocurrencia de las variables claves, antes de realizar cualquier simulación con el modelo.
- Los analistas deben esforzarse constantemente por credibilidad. Un fundamento del análisis de riesgo es, por lo tanto, comparar con la realidad; en otras palabras, credibilidad. Con esto se pueden encontrar similitudes con situaciones conocidas, por correlación o verificando los límites con la realidad. Se debe verificar la respuesta contra la realidad, esto es, validar el modelo. Si no hay datos suficientes, se debe buscar el juicio experto con el fin de proteger la credibilidad del modelo.

- Se debe expresar la incertidumbre de la respuesta en forma de una distribución de probabilidad acumulada. Esta distribución expresa el rango de incertidumbre de un problema complejo y sus proyecciones, logrando con ello:
  a) Demostrar la falacia de una respuesta simple.
  b) Ilustrar todas las posibles respuestas basado en el estimado de incertidumbres.
  c) Proveer un valor medio y mostrar la ocurrencia de los valores más frecuentes, indicando además la probabilidad de ocurrencia asociada. Se debe recordar que no existe una respuesta simple a un problema, pronostico o proyección que tiene gran incertidumbre.

  En cualquier caso, se debe expresar la respuesta final en forma de una distribución acumulada. Esta aproximación evitará que aparezca el síndrome de la respuesta simple.
- Los modelos matemáticos usados para sintetizar el análisis de riesgo emplean la simulación de Monte Carlo. Es importante entender que esta simulación por sí misma no es análisis de riesgo, es tan sólo una herramienta para facilitar el proceso. A través de la simulación de Monte Carlo, se utilizan todos los valores posibles de las variables para calcular el rango completo de resultados. La metodología mostrada en este trabajo provee una forma fácil de mostrar e interpretar los resultados para la toma de decisiones.
- La metodología desarrollada en este trabajo indica como describir una variable con su distribución de probabilidades, en lugar de un simple número. La distribución de probabilidades contiene información de todos los posibles valores que puede tomar y la probabilidad de ocurrencia de cada valor.
- Finalmente, es prudente tener presente que, aunque se haya confrontado el modelo con la realidad (si la hay) y se hayan satisfecho todos los requisitos necesarios y considerado todas las variables correctas, el problema no ha terminado, ya que debe recordarse que el proyecto tiene una vida útil. Por esta razón se requiere realizar una evaluación periódica del progreso de los resultados (informes post-mortem).

7. BIBLIOGRAFÍA

- Alexander, J.A. **Risk Analysis: Lessons Learned**. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Lousiana,1998.
- Clemen, R.T. **Making Hard Decisions – An Introduction to Decision Analysis**. Brooks/Cole Publishing Company, California, 1996.
- Dinsmore, Paul C. **The AMA Handbook of Project Management**. New York, AMACON, 1993.
- Evans, James R. **Introduction to Simulation and Risk Analysis**. New Jersey, Prentice Hall, 1998.
- Forth, Ron. **An alternative approach to risk analysis recognizing the limitations of conventional probabilistic methods**. SPE Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium, Dallas, 1997.
- Kerzner, Harold. **Project Management. A systems approach to Planning, Scheduling and Controlling**. New York, Van Nostrand Reinhold, 1995.
- Palacios A., Luis E. **Principios esenciales para realizar proyectos**. Caracas, UCAB, 2000.
- Peterson, S.K. **Risk Analysis and Monte Carlo Simulation Applied to the Generation of Drilling AFE Estimates**. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, 1993.
- Project Management Institute **A Guide to the Project Management Body of Knowledge**. EEUU, PMI, 2000
- Vose, D. **Quantitative Risk Analysis – A Guide to Monte Carlo Simulation Modelling**. Chichester, England, John Wiley & Sons Ltd, 1996.