"METODOLOGÍA ESTOCÁSTICA INTEGRAL PARA EVALUACIÓN DE PROYECTOS EXPLORATORIOS, CONSIDERANDO INCERTIDUMBRE DE LA INFORMACIÓN E INTERDEPENDENCIA PROBABILÍSTICA ENTRE PROSPECTOS Y DIFERENTES OBJETIVOS GEOLÓGICOS"

Medardo Yañez, Karina Semeco, Michele Leccese, Pedro Gil, José Fariñas, Miguel Agüero.
Reliability and Risk Management México SA de CV– R2M México SA de CV

e-mail: medardo.yanez@reliarisk.com, karina.semeco@reliarisk.com, michele.leccese@reliarisk.com, pedro.gil@reliarisk.com, jose.farinas@reliarisk.com,

Esta metodología, de naturaleza totalmente estocástica, ha sido diseñada para evaluar y optimizar Proyectos Exploratorios que integran múltiples oportunidades o prospectos y generar un portafolios de Opciones de Mitigación de Riesgo conformado por acciones específicas que afecten las variables críticas y que apunten a:

- ✓ Mejorar la Rentabilidad de los Proyectos Exploratorios de Inversión
- ✓ Incrementar el Éxito Geológico de las Campañas Exploratorias
- ✓ Reducción del OPEX de Exploración

Los elementos diferenciadores y claves de la metodología propuesta son los siguientes:

- ✓ Considera la incertidumbre natural de la información en la etapa exploratoria e incorpora técnicas diferenciadas para hacer inferencia estadística válida con distintos tipos, calidades y cantidades de información, con énfasis en información escasa, incierta o análoga.
- ✓ Establece una secuencia óptima de perforación que maximiza la promesa de valor asociada a un conjunto de oportunidades, para lo cual considera:
  - Selección óptima de los prospectos que integrarán el proyecto a desarrollar buscando la mejor combinación entre la madurez y nivel de definición de sus modelos y al recurso a incorporar asociado a los mismos.
  - Evaluación de múltiples posibles secuencias de actividad tomando en cuenta la disponibilidad de equipos de perforación, los costos de movilización, la disponibilidad de instalaciones; entre otros
- ✓ Permite la generación de Pronósticos Estocásticos de Producción y de Inversiones en Pozos Exploratorios con sus respectivos Pozos de Desarrollo, basado en el concepto de Pozo Tipo Análogo y en un Árbol de Probabilidades que considera el éxito geológico determinado para cada localización exploratoria, la probabilidad de éxito de pozos de desarrollo y el efecto de la dependencia probabilística entre oportunidades exploratorias y entre diferentes objetivos geológicos.

Palabras claves: Exploratorio, Recursos, Estocástico, Estimación, Datos Análogos, Prospecto, Éxito Geológico, Interdependencia Geológica, Optimización, Secuencia Óptima, Simulación de Montecarlo.

1. Introducción

Exploración es el término utilizado en la industria petrolera para designar la búsqueda de hidrocarburos. Desde los inicios de la explotación petrolera hasta la actualidad se han desarrollando nuevas y complejas tecnologías para inferir la presencia de hidrocarburos que han permitido reducir algunos factores de riesgo, sin embargo, no se ha logrado aún desarrollar un método de inferencia que permita definir o asegurar la presencia de hidrocarburos. Es por ello que para comprobar la existencia de hidrocarburos se debe recurrir a la perforación de pozos exploratorios; solo entonces puede asegurarse que lo que se definió como "prospecto" es y funciona como "yacimiento de hidrocarburos".

La "exploración", en el contexto de la industria de los hidrocarburos, es por su naturaleza, la etapa en la cual se manejan mayores niveles de incertidumbre y paradójicamente, es también la etapa en la cual se toman decisiones que impactan en mayor medida (para bien o para mal) la economía de los proyectos.

Históricamente, el reto de "valorar" económicamente proyectos de exploración y producción, desde la fase exploratoria, se ha asumido con diversos enfoques metodológicos que han evolucionado con el tiempo, y que desde distintos ángulos tratan de hacer frente a la necesidad de justificar elevadas inversiones con modelos que se alimentan de información escasa, incierta o difusa.

Esta característica de la etapa exploratoria implica:

✓Utilización probabilidad e inferencia estadística como pilares fundamentales para el cálculo de posibilidades

✓Utilización de modelos de decisión que toman en cuenta la incertidumbre de las variables; es decir modelos basados en conceptos de riesgo.

La utilización de la probabilidad y la inferencia estadística en exploración ha evolucionado desde estadística tradicional hasta estadística bayesiana [1],[2].

NOTA: La estadística Bayesiana tiene múltiples aplicaciones, pero en el contexto del mundo exploratorio tiene dos aplicaciones particularmente importantes:

1. Probabilidades Condicionales que aplican para modelar la dependencia entre prospectos y entre objetivos geológicos. Esta aplicación se explicara detalladamente más adelante en el documento
2. Tratamiento de información escasa, incierta o difusa, que se explica a continuación.

La estadística tradicional es la ciencia de la "experiencia" y pudiéramos decir que es el arte de darle forma matemática a la experiencia; sin embargo; un problema típico de nuestros días es que necesitamos hacer estimaciones sobre procesos o situaciones "nuevas" sobre las que o no tenemos experiencia o historia, o si la tenemos, la misma es escasa o insuficiente. En estos casos, nos basamos en experiencias similares de "otros" que pueden servirnos como referencia, la filtramos y adecuamos a nuestra realidad usando nuestro sentido común, y posteriormente estimamos y decidimos. Es importante destacar que casi nunca decidimos basados totalmente en la experiencia de otros; y tampoco lo hacemos basados solo en nuestro sentido común o experiencia propia. Lo más común es combinar ambas.

La Estadística Bayesiana; a través del Teorema de Bayes nos permite hacer estas combinaciones, de forma estructurada y matemáticamente soportada. El teorema permite tratar a la experiencia de otros como "Conocimiento previo (prior knowledge)"; normalmente representado por una distribución de probabilidades; y a nuestra experiencia (datos propios) o sentido común (opinión de expertos) como "evidencia (Evidence)".Ambas son combinadas matemáticamente obteniendo una distribución de probabilidades modificada conocida como "conocimiento posterior, mejorado o actualizado (Posterior Knowledge).

Por su parte la toma de decisiones ha pasado de utilizar modelos de riesgo cualitativos al uso intensivo de análisis cuantitativo de riesgos [3],[4].

NOTA: El Análisis de Riesgo tiene dos escuelas o tendencias claramente diferenciadas; la Escuela Cualitativa o de Índices Subjetivos y la Escuela Cuantitativa.

La escuela Cualitativa o de índices Subjetivos utiliza como herramienta base de análisis las Matrices de Múltiples Atributos, cuyo principal producto es una "calificación del riesgo (alto, medio, bajo)". La principal virtud de esta tendencia es la velocidad y facilidad del análisis; pero su debilidad es la subjetividad e inauditabilidad del mismo.

La escuela Cuantitativa por su parte utiliza como herramienta base de análisis la Caracterización Probabilística de la Información de Variables y el Modelaje Estocástico de Procesos. Su producto es una "cuantificación del riesgo", su principal virtud es la reducción de la subjetividad y la trazabilidad del análisis; mientras que su debilidad es la complejidad.

Los "exploradores" son para la industria del gas y del petróleo, los pioneros en la utilización de modelos estocásticos y en la formalización del análisis de riesgo como ciencia base para la toma de decisiones. Ejemplos claros de lo anteriormente expuesto se muestran en los siguientes trabajos:

- ✓ Newendorp P.D.[5],"Decision Analysis for Petroleum Exploration", de1975.
- ✓ Capen E.C.[6], "The Difficulty of Assessing Uncertainty", de 1976
- ✓ Megill R.E.[7], "An Introduction to Risk Analysis", de 1984
- ✓ Rose, Peter R.[8] Dealing with Risk and Uncertainty in Exploration de 1987
- ✓ Rose, Peter R.[9], "The Business of Petroleum Exploration" de 1992.
- ✓ S.K. Peterson, J.A. Murtha, F.F. Schneider.[10], "Risk Analysis and Monte Carlo Simulation Applied to the Generation of Drilling AFE Estimates" de 1993.
- ✓ Murtha J.A.[11], "Estimating reserves and Success for a prospect with geologically dependent layers" – de 1995
- ✓ Galli A., Armstrong M., Jehl B.[12], "Comparing Three Methods for Evaluating Oil Projects Option Pricing, Decision Trees, and Monte Carlo Simulations" de 1999.
- ✓ Wang B., Kokolis G., Litvak L.B., Rapp W.J.[13], "Dependent Risk Calculations in Multiple-Prospect Exploration Evaluations" de 2000.
- ✓ Falla L.C.[14]," Probabilistic Model To Develop Multilayer Gas and Oil Prospects" de 2001
- ✓ Coordinating Committee for Offshore Prospecting in Asia.[15], "Guidelines for Risk Assessment of Petroleum Prospects" de 2001

En estos trabajos se proponen enfoques que muestran claramente la evolución en la utilización de técnicas para el modelaje de la incertidumbre y el riesgo que van desde las probabilidades simples, pasando por probabilidades condicionales, probabilidades bayesianas, arboles de probabilidad, simulación de Montecarlo y finalmente combinación de arboles de decisión con simulación de Montecarlo e interdependencia probabilística.

Adicionalmente, estos trabajos atienden separadamente aspectos variados como:

- ✓ Estimación Probabilista de Recursos y Reservas
- ✓ Estimación de Probabilidad de Descubrimiento o Probabilidad de Éxito Geológico
- ✓ Dependencia Probabilística entre Prospectos y Objetivos Geológicos
- ✓ Pronósticos de Producción asociados a un conjunto de Oportunidades
- ✓ Evaluación Económica de un Proyecto Exploratorio

En el presente trabajo, se presenta una metodología que atiende todos los aspectos anteriormente mencionados de manera integrada, y se agregan aspectos claves para darle aún más sentido de realidad a la valoración económica de proyectos y herramientas para y generar un portafolios de Opciones de Mitigación de Riesgo conformado por acciones específicas que afecten las variables críticas y que apunten a:

- ✓ Mejorar la Rentabilidad de los Proyectos Exploratorios de Inversión
- ✓ Incrementar el Éxito Geológico de las Campañas Exploratorias
- ✓ Reducción del OPEX de Exploración

Los elementos diferenciadores y claves de la metodología propuesta son los siguientes:

- ✓ Considera la incertidumbre natural de la información en la etapa exploratoria e incorpora técnicas diferenciadas para hacer inferencia estadística válida con distintos tipos, calidades y cantidades de información, con énfasis en información escasa, incierta o análoga.
- ✓ Permite la generación de Escenarios Factibles de incorporación de recursos y reservas, y facilita la rápida evaluación y reducción a un número razonable de opciones técnicamente viables
- ✓ Establece, para cada escenario de incorporación de recursos y reservas, una secuencia óptima de perforación que maximiza la promesa de valor asociada a un conjunto de oportunidades, para lo cual considera:

- Selección óptima de los prospectos que integrará el proyecto a desarrollar buscando la mejor combinación entre la madurez y nivel de definición de sus modelos y al recurso a incorporar asociado a los mismos.
- Evaluación de múltiples posibles secuencias de actividad tomando en cuenta la disponibilidad de equipos de perforación, los costos de movilización, la disponibilidad de instalaciones; entre otros

✓ Permite, para cada escenario de incorporación de recursos y reservas, la generación de Pronósticos Estocásticos de Producción y de Inversiones en Pozos Exploratorios con sus respectivos Pozos de Desarrollo, basado en

- Árbol de Probabilidades que considera el éxito geológico determinado para cada localización exploratoria tomando en cuenta el efecto de la dependencia probabilística entre oportunidades exploratorias y entre diferentes objetivos geológicos.
- Trabaja con doble probabilidad en la simulación; una correspondiente al pozo exploratorio, y otra correspondiente al desarrollo del área con pozos de desarrollo si la localización exploratoria es exitosa (geológica y comercialmente).

✓ Evaluación Económica Estocástica, para cada escenario de incorporación de recursos y reservas.

2. Metodología Propuesta:

La **"Metodología Estocástica Integral para Evaluación de Proyectos Exploratorios, considerando Incertidumbre de la Información e Interdependencia Probabilística entre Prospectos y Diferentes Objetivos Geológicos"**, puede dividirse en las siguientes etapas generales:

1. Evaluar múltiples escenarios de incorporación de Recursos y seleccionar un conjunto de escenarios técnicamente factibles.
2. Para cada escenario de incorporación de Recursos seleccionado:

   2.1. Realizar la estimación probabilista de Volúmenes y Recursos para cada prospecto que integre la cartera de Exploración.

   2.2. Estimar el Probabilidad de Éxito Geológico (Pg) para cada prospecto que integre la cartera de Exploración, considerando interdependencia probabilística entre prospectos y objetivos geológicos

   2.3. Generar una Actividad de Perforación Optimizada y Calendarizada basada en:

   ✓ Selección óptima de los prospectos que integrarán el proyecto a desarrollar buscando la mejor combinación entre la madurez y nivel de definición de sus modelos y al recurso a incorporar asociado a los mismos.

   ✓ Evaluación de múltiples posibles secuencias de actividad tomando en cuenta la disponibilidad de equipos de perforación, los costos de movilización, la disponibilidad de instalaciones

   2.4. Generación, para la Actividad de Perforación Optimizada y Calendarizada, de Pronósticos Estocásticos de:

   ✓ Producción Diaria y Acumulada de Aceite, Agua y Gas

   ✓ Inversiones en Pozos Exploratorios y Pozos de Desarrollo El concepto de Pozo Tipo Análogo

   2.5. Evaluación Económica Probabilista para la Actividad Optimizada.

3. Jerarquizar entre los escenarios evaluados y selección del escenario de incorporación de Recursos óptimo.

A continuación se describen y detallan los aspectos técnicos más importantes de cada una de estas etapas:

Etapa 1: Evaluar múltiples escenarios de incorporación de Recursos y seleccionar un conjunto de escenarios técnicamente factibles.

Etapa 2: Evaluación Estocástica de Cada Escenario Seleccionado

Etapa 2.1: Realizar la estimación probabilista de Volúmenes y Recursos [11],[13],[14],[16],[17], para cada prospecto que integre la cartera de Exploración.

La metodología considera la estimación probabilista de Volúmenes y Recursos para cada localización exploratoria basado el procedimiento descrito en los Capítulos 5 y 6 del "Guidelines for the Evaluation of Petroleum Reserves and Resources SPE 2001"[16]. La figura 1 muestra un esquema del procedimiento previamente mencionado:

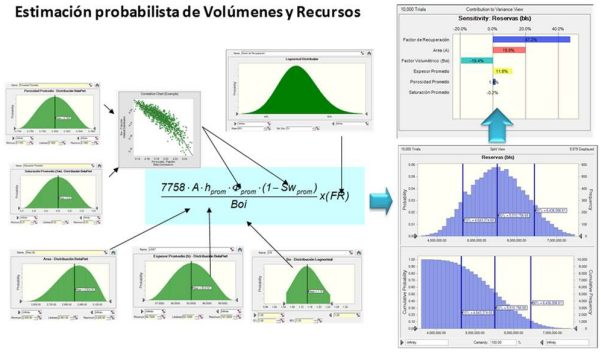

Figura 1 – Esquema del Procedimiento para Estimación probabilista de Volúmenes y Recursos basado en los Capítulos 5 y 6 del "Guidelines for the Evaluation of Petroleum Reserves and Resources SPE 2001"

Aspectos que requieren particular atención en esta etapa son las siguientes:

✓ Atender rigurosamente los criterios y conceptos del sistema de clasificación de Recursos Prospectivos expresados en el documento "Petroleum Resources Management System PRMS", avalado por SPEE: Society of Petroleum Evaluation Engineers, SPE: Society of Petroleum Engineers, WPC: World Petroleum Council y AAPG: American Association of Petroleum Geologists. [18]

✓ Caracterización probabilística adecuada para cada una de las variables que intervienen en el cálculo. La característica

de la información en la etapa exploratoria implica el uso de "datos análogos" y "opinión de expertos", debido a "poca evidencia o datos propios". Esto implica el uso intensivo del Teorema de Bayes [1],[2],[3],[4]. La figura 2 esquematiza el uso del citado teorema en la estimación de las distribuciones de probabilidad de los promedios de las propiedades que intervienen en el cálculo de recursos.

- ✓ Considerar las correlaciones probabilísticas entre propiedades en los casos en que aplique, y truncar apropiadamente las distribuciones de probabilidad en rangos "físicamente posibles"

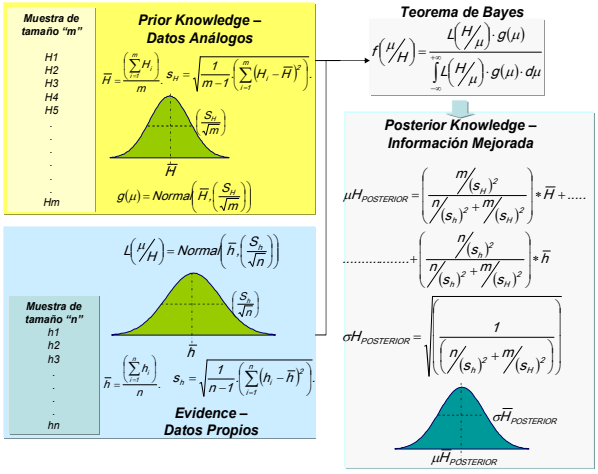

Figura 2 – Esquema del Procedimiento para Caracterización Probabilística de las Distribuciones de Probabilidad de los Promedios de las Propiedades (Porosidad, Saturación, Espesor), a partir de evidencia escasa y datos análogos, con el Teorema de Bayes"

- ✓ Tratar adecuadamente la dependencia probabilista entre "múltiples" objetivos geológicos o "layers" dentro de un mismo prospecto. Las referencias [11],[13],[14] son excelentes trabajos que abordan detalladamente el tema mencionado.
- ✓ En caso de requerirse la sumatoria de recursos, es muy importante considerar la dependencia entre prospectos, y el nivel de incertidumbre de cada estimación, este punto es detalladamente tratado en el Capítulo 6 del la referencia [16]; y es considerado un aspecto clave para el cálculo de recursos.

Etapa 2.2: Estimar el Probabilidad de Éxito Geológico o Probabilidad de Descubrimiento (Pg) para cada prospecto que integre la cartera de Exploración, considerando interdependencia entre prospectos y objetivos geológicos.

Para estimar la Pg se establecen los rangos de probabilidad de existencia de cada uno de los procesos que se requieren para que funcione el sistema petrolífero:

- ✓ Presencia de una Roca Almacén o Reservorio
- ✓ Presencia de una Trampa
- ✓ Presencia de un Sistema de Carga de Hidrocarburos
- ✓ Efectiva retención de los hidrocarburos después de la migración

En consecuencia, el modelo para estimar la probabilidad de descubrimiento Pg se basa en cuatro parámetros probabilistas:

- ✓ **P1:** Probabilidad de la presencia de una roca almacén o reservorio efectiva
- ✓ **P2:** Probabilidad de la presencia de una trampa efectiva
- ✓ **P3:** Probabilidad de la Presencia de un Sistema de Carga de Hidrocarburos
- ✓ **P4:** Probabilidad de una efectiva retención de los hidrocarburos después de la migración

Finalmente; la probabilidad de descubrimiento Pg, se estima con el siguiente modelo:

Pg= P1 x P2 x P3 x P4 (1)

Pg= P(Roca Almacén) x P(Trampa) x P(Carga) x P(Retención)

NOTA: A continuación se explica con más detalle cada uno de estos parámetros probabilistas:

P1: Probabilidad de la presencia de una roca almacén o reservorio efectiva:

Esta probabilidad contempla a su vez dos aspectos:

El primero (**P1a**): es la probabilidad de existencia de facies del reservorio con un mínimo de propiedades tales como la relación net/gross y espesor.

El segundo (**P1b**): es la probabilidad de que la roca reservorio o almacén tenga efectivamente propiedades de porosidad, permeabilidad y saturación de hidrocarburos

Finalmente: **P1= P1a x P1b** (2)

P2: Probabilidad de la presencia de una trampa efectiva:

Esta probabilidad contempla a su vez dos aspectos:

El primero (**P2a**): es la probabilidad de existencia de un volumen de roca reservorio

El segundo (**P2b**): es la probabilidad de que exista un efectivo mecanismo de sello para la estructura y que se forme la trampa.

Finalmente: **P2= P2a x P2b** (3)

P3: Probabilidad de la Presencia de un Sistema de Carga de Hidrocarburos

Esta probabilidad contempla a su vez dos aspectos:

El primero (**P3a**): es la Probabilidad de existencia de una Roca Fuente o Generadora

El segundo (**P3b**): es la probabilidad de una eficiente migración desde la Roca Fuente a la trampa

Finalmente: **P3= P3a x P3b** (4)

P4: Probabilidad de una efectiva retención de los hidrocarburos después de la migración: evalúa la probabilidad de que la trampa se haya llenado de hidrocarburo en un determinado periodo en el tiempo

El "Guidelines for Risk Assessment of Petroleum Prospects"[15], aborda detalladamente el tema de la estimación de cada uno de los parámetros que intervienen en la estimación de la Pg.

La estimación de Pg para cada uno de los prospectos que integran una cartera exploratoria es un aspecto bastante conocido y dominado por las Organizaciones de Exploración en la industria; no obstante, un aspecto que requiere particular atención en la estimación de la Pg es considerar *el efecto de dependencia entre prospectos y dependencia entre diferentes objetivos geológicos*.

NOTA: La dependencia probabilística o "interdependencia entre oportunidades exploratorias o prospectos" implica que el resultado de la perforación de cualquiera de los prospectos (éxito o fracaso), impacta la probabilidad de descubrimiento de los demás.

La independencia entre prospectos puede asumirse por ejemplo en el caso de que pertenezcan a diferentes plays geológicos; pero si pertenecen al mismo play, debe considerarse la interdependencia.

Este tipo de cálculos probabilísticos se basan en probabilidades condicionales y están regidos por el llamado Teorema de Bayes [1],[2],[3],[4],[15].

Para ilustrar el efecto de la interdependencia, se muestra un ejemplo de 5 prospectos "X" que se encuentran en un área exploratoria y se consideran dependientes. Como se explica en la ecuaciones (1),(2),(3) y (4) para estimar la Pg deben considerarse múltiples parámetros probabilistas

En el caso de prospectos interdependientes, deben separarse los factores de la ecuación anterior en dos grupos; factores comunes para todos los prospectos, que generarán una probabilidad P(S) , y factores no comunes en los diferentes prospectos analizados, que generarán probabilidades distintas denotadas como P(X/S).En este caso, aplicando el Teorema de Bayes[1],[2],[15]; en su acepción para el tratamiento de probabilidades condicionales, la probabilidad de descubrimiento de un determinado prospecto "X", se expresa como: **P(X)=P(S) x P(X|S)** (5)

La tabla 1 muestra los cálculos de las probabilidades individuales P(X) para el ejemplo de los 5 prospectos

Factores de Probabilidad		Prospecto A	Pospecto B	Prospecto C	Prospecto D	Prospecto E
P1a	Facies del Reservorio	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
P1b	Porosidad	0.6	1.0	0.5	0.8	0.9
P2a	Identificación de la Trampa	1.0	0.9	0.9	0.7	0.6
P2b	Sello	0.9	0.9	0.8	1.0	1.0
P3a	Roca Fuente	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
P3b	Migración	1.0	0.8	0.9	0.8	0.8
P4	Retención	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
P(S)=P1a x P3a x P4	Factores Comunes	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
P(X/S)=P1b x P2a x P2b x P3b	Factores Independientes	0.54	0.648	0.324	0.448	0.432
P(X)=P(S) x P(X/S)	Probabilidad Individual	0.3024	0.3629	0.1814	0.2509	0.2419

Tabla 1 – Muestra los factores P1a, P3a y P4 comunes para los 5 prospectos, y P1b, P2a, P2b y P3b, no comunes o independientes en los 5 prospectos. Con esto se calcula P(S)=P1a x P3a x P4, y P(X/S)=P1b x P2a x P2b x P3b, para cada prospecto, y finalmente se obtienen las probabilidades individuales P(A), P(B), P(C), P(D) y P(E) utilizando la ecuación de Bayes P(X)=P(S) x P(X/S).

Con los resultados que se resumen en la Tabla 1, puede ahora calcularse como se afectan las probabilidades individuales, por ejemplo en el caso de que el Prospecto A resulte exitoso; utilizando el árbol que se muestra en la figura 3.

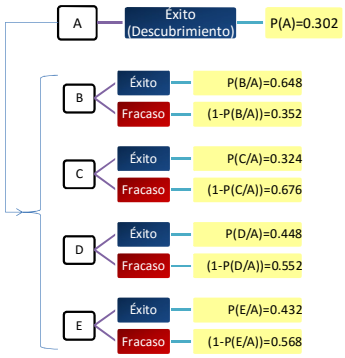

Figura 3 – Árboles de Probabilidades Condicionales si A resulta exitoso.

Si el Prospecto A resulta un descubrimiento, la probabilidad de hacer descubrimientos en B, C, D y se incrementa porque los factores comunes se confirman, es decir P(S)=1, por lo que P(X)= P(X/S), lo que significa que la probabilidad de descubrimiento en B, C, D y E es gobernada por los factores no comunes o independientes.

También puede calcularse como se afectan las probabilidades individuales en el caso de que el Prospecto A resulte un fracaso; utilizando el citado Teorema de Bayes[1],[2],[15]; para construir un árbol de probabilidades condicionales como el de la figura 4

Si el Prospecto A resulta un fracaso, la probabilidad de hacer descubrimientos en B, C, D se reduce sustancialmente pero aún hay una probabilidad remanente. Para calcular dicha probabilidad, se deriva del Teorema de Bayes[1],[2],[15]; la siguiente expresión:

$$\mathbf{P(X|\bar{A}) = (P(X) \times [1-P(S_A)])/[1-P(A)]} \qquad (6)$$

La expresión implica que la probabilidad remanente de éxito en un prospecto X dado que A es un fracaso $P(X|\bar{A})$ es su probabilidad de éxito P(X) afectada por la probabilidad de que la causa del fracaso de "A" hayan sido los factores independientes $[1-P(S_A)]$.

Aplicando (6) a los prospectos B,C,D y E, se obtiene

- ✓ Probabilidad de B exitoso dado que A sea un fracaso:

$P(B|\bar{A}) = [0.3639 \times (1 - 0.54)] / (1 - 0.3024) = 0.239$

- ✓ Probabilidad de C exitoso dado que A sea un fracaso:

$P(C|\bar{A}) = [0.1814 \times (1 - 0.54)] / (1 - 0.3024) = 0.120$

- ✓ Probabilidad de D exitoso dado que A sea un fracaso:

$P(D|\bar{A}) = [0.2509 \times (1 - 0.54)] / (1 - 0.3024) = 0.165$

- ✓ Probabilidad de E exitoso dado que A sea un fracaso:

$P(E|\bar{A}) = [0.2419 \times (1 - 0.54)] / (1 - 0.3024] = 0.160$

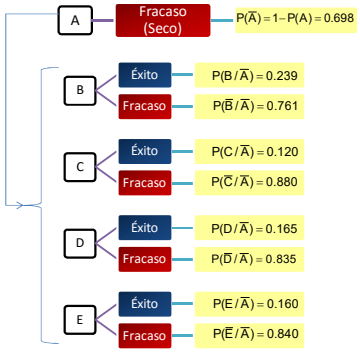

Figura 4 – Árboles de Probabilidades Condicionales si A resulta un fracaso.

Finalmente, el modelo probabilístico para el conjunto de los cinco (5) prospectos analizados de resume en el árbol de probabilidades que se muestra en la figura 6.

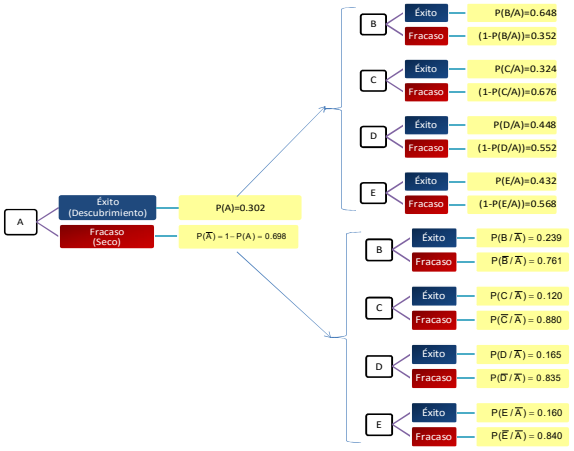

Figura 6 – Árbol de Probabilidades Prospectos Condicionales de los prospectos B,C,D y E dependiendo del resultado en A

Etapa 2.3: Generar una Actividad de Perforación Optimizada y Calendarizada

Uno de los elementos que contribuye en mayor cuantía al éxito geológico, volumétrico y económico de las campañas exploratorias, es la secuencia de actividad de perforación seleccionada. La tendencia natural, es dirigir los esfuerzos hacia aquellos prospectos en los que se estima una mayor acumulación de hidrocarburos y se sospeche la presencia de hidrocarburos de interés para la estrategia empresarial; pero, al respecto, aparecen varias interrogantes:

- ✓ Son estos los prospectos con modelos mejor definidos?
- ✓ Qué robustez tiene la información con la que se definieron los modelos?
- ✓ Qué riesgo geológico fue definido para cada prospecto?
- ✓ Hay instalaciones cercanas para manejar la producción en caso de un descubrimiento?
- ✓ Hay disponibilidad de equipos de perforación para las fechas estimadas?
- ✓ Qué costos de movilización y de acondicionamiento de la zona a perforar implica?

Para contestar y atender estas interrogantes y otras interrogantes, en la búsqueda de una secuencia de actividades que apunte a maximizar valor, la metodología propuesta considera dos actividades o etapas claves:

Etapa 2.3.1: Selección óptima de los prospectos que integrarán el proyecto a desarrollar buscando la mejor combinación entre la madurez y nivel de definición de sus modelos y al recurso a incorporar asociado a los mismos.

El Índice de Confiabilidad o Madurez es un indicador que permite dimensionar el nivel de definición, la confiabilidad, madurez, robustez, e incertidumbre del modelo de un prospecto. Este índice o indicador mejora las jerarquizaciones de Prospectos.

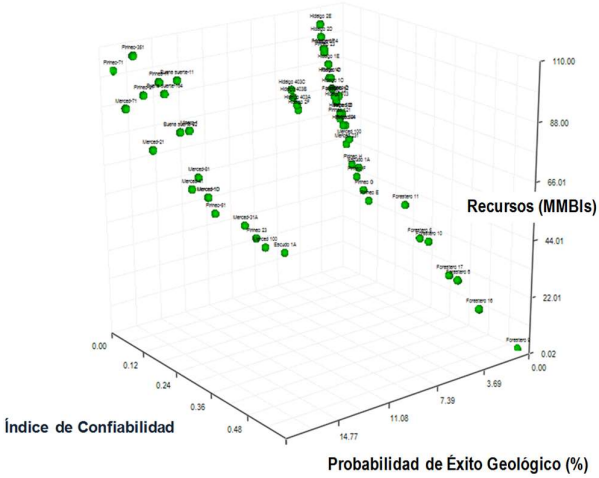

Figura 7 – Modelo (Matriz 3D) de Jerarquización que considera Recurso a Incorporar, Índice de Confiabilidad y Riesgo Geológico, de cada localización exploratoria de la cartera de Exploración.

A partir de esta Matriz puede seleccionarse el conjunto de prospectos que presentan la mejor combinación entre Recurso a Incorporar, Prob.de Éxito Geológico (Pg) e Índice de Confiabilidad.

El conjunto de prospectos seleccionados constituye la actividad que ahora debe calendarizarse; pero, en cual orden deben perforarse estos pozos o localizaciones exploratorias para obtener la máxima rentabilidad?. Esta pregunta es atendida en la siguiente etapa.

Etapa 2.3.2: Evaluación de múltiples posibles secuencias de la actividad seleccionada en la etapa previa; tomando en cuenta la disponibilidad de equipos de perforación, los costos de movilización, la disponibilidad de instalaciones.

Para lograr la "secuencia óptima" se ensayan miles de combinaciones, mediante un poderoso algoritmo de simulación hasta obtener la combinación de actividades (secuencia) que maximiza la rentabilidad.

Figura 8 – A partir de la Cartera Optimizada lograda en la etapa anterior, se genera la Secuencia Óptima u Actividad Calendarizada Óptima, mediante la evaluación de múltiples posibles secuencias de actividad tomando en cuenta la disponibilidad de equipos de perforación, los costos de movilización, la disponibilidad de instalaciones.

Etapa 2.4: Generación de Pronósticos Estocásticos de Producción de Aceite, Agua y Gas y de Inversiones en Pozos Exploratorios y Pozos de Desarrollo

Esta etapa se sustenta en los siguientes elementos:

- ✓ El concepto de Pozo Análogo – Probabilista

NOTA: El pronóstico de producción en el ciclo de vida útil del pozo se obtiene a partir del gasto inicial, que se "declina" a una velocidad equivalente a un factor (D) conocido como "factor de declinación o velocidad de declinación". El perfil resultante es también conocido como "curva de declinación del pozo".

Las curvas de declinación de producción representan un método dinámico para predecir en forma aproximada la futura capacidad de producción de los pozos, yacimiento y campos.

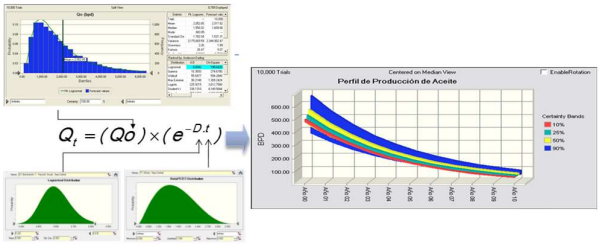

Figura 10 - Pronóstico de Producción siguiendo un modelo de declinación exponencial. Nótese que el Gasto Inicial (Qo), la Declinación (D) y el Tiempo de Vida del Pozo (t), se tratan en forma probabilista.

El concepto de Pozo Análogo tiene que ver con caracterizar probabilísticamente el comportamiento de producción de los pozos de un campo o yacimiento análogo al prospecto que se va a perforar.

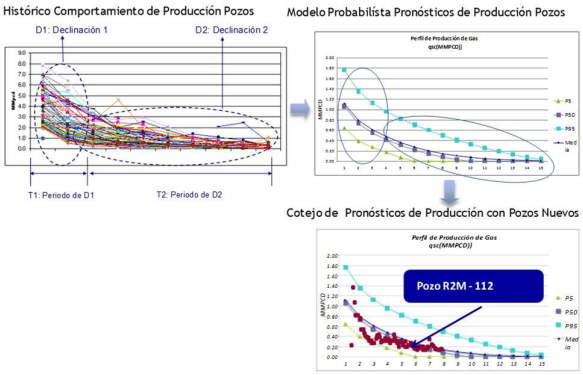

Figura 11 Pozo Análogo: Un modelo de pronóstico de producción de un pozo análogo debe reproducir el comportamiento histórico (pasado) del la producción de un campo análogo, y debe cotejar con los pozos nuevos para los que se realizó el pronóstico.

- ✓ Actividad Optimizada y Calendarizada de Localizaciones Exploratorios.
- ✓ Árbol de Probabilidades basado en el éxito geológico determinado para cada localización exploratoria, que tomen en cuenta el efecto de dependencia entre oportunidades exploratorias y dependencia entre diferentes objetivos geológicos

Toda esta información alimenta un modelo probabilista generado y que reside en una herramienta computacional la cual genera:

• El Perfil Probabilista o Banda Pronóstico de Producción.

• Comparación entre el Perfil Probabilista Acumulado y la curva de Recursos a Incorporar (IR) estimados por Exploración.

• El Perfil Probabilista de Inversiones, distinguiendo:

- ✓ Inversiones en Pozos Exploratorios
- ✓ Inversiones en Pozos de Desarrollo, en caso de que una localización exploratoria resulte exitosa.

La figura 12 muestra un esquemático del procedimiento que sigue la herramienta computacional previamente mencionada.

Es importante destacar que la herramienta probabilista trabaja con doble probabilidad de éxito en la simulación; (árboles de probabilidades y eventos) una probabilidad correspondiente al pozo exploratorio, y otra probabilidad correspondiente al desarrollo del área con pozos de desarrollo si la localización exploratoria es exitosa.

La figura 13, muestra el Árbol de Probabilidades para el Desarrollo de Oportunidades Exploratorias.

El centro de este árbol es el Árbol de Probabilidad de Éxito Geológico, que habilitará o inhabilitará los Árboles de Probabilidad de la Actividad de Perforación de Pozos de Desarrollo.

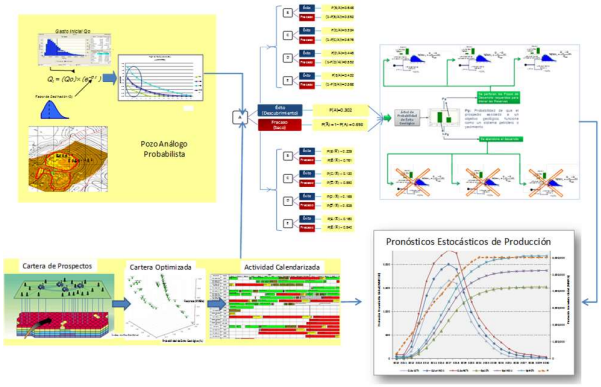

Figura 12 – Esquema de la Metodología para la Generación de Pronósticos Estocásticos de Producción.

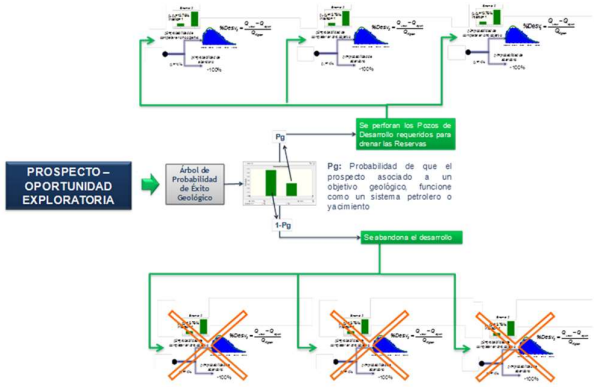

Figura 13 - Árbol de Probabilidades para el Desarrollo de Oportunidades Exploratorias. En una simulación, cada vez que se genere un (1) desde la Binomial de Éxito Geológico , se habilitarán las Binomiales de los Árboles de Probabilidad de la Actividad de Perforación de Pozos de Desarrollo ya que esto implica que el prospecto es un yacimiento, y cada vez que se genere un cero, se deshabilitarán las mencionadas Binomiales de desarrollo ya que esto implica que la oportunidad exploratoria no es un yacimiento explotable.

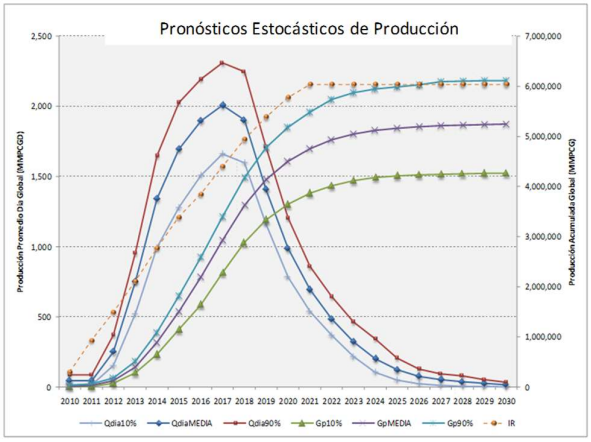

Figura 14 - Pronóstico Estocástico de Producción ampliado, en el que puede distinguirse las banda probabilista (P10,Media y P90) de Producción Promedio Día, la de Producción Acumulada y la Curva IR tradicionalmente estimada por Exploración.

Etapa 2.5: Evaluación Económica Probabilista.

Basados en el Perfil de Producción generado (ver figura 14) se generan paralelamente de forma probabilista los perfiles de Ingresos e Inversión correspondientes a:

- Perfil probabilista de Ingresos Exploratoria Global
- Perfil probabilista de Inversión Exploratoria Global
- Perfil probabilista de Inversión de Perforación de Desarrollo
- Perfil probabilista de Inversión Exploratoria
- Perfil probabilista de Inversión en Sísmica

La figura 15 muestra esquemáticamente el proceso para la evaluación económica probabilista que toma como insumos los perfiles estocásticos previamente mencionados.

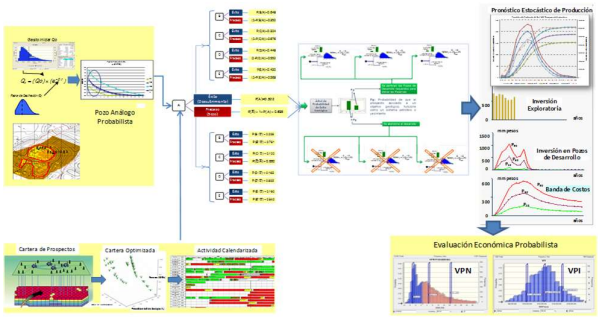

Figura 15 – Esquema del proceso para la evaluación económica probabilista

Etapa 3: Jerarquizar entre los escenarios evaluados y selección del escenario óptimo de incorporación de Recursos.

Con base en el análisis de los resultados obtenidos para cada escenario de incorporación de recursos evaluado, ahora se jerarquizan y se selecciona aquel que generen mayor valor; es decir, el escenario con una combinación óptima de rentabilidad y riesgo.

El proceso de jerarquización se fundamenta en extraer de las distribuciones probabilidades del VPN y del VPI obtenidas para cada escenario (ver figura 15), tres parámetros: el factor de rentabilidad, el factor de riesgo y la eficiencia de la inversión.

- ✓ El Factor de Rentabilidad del Escenario, está representado por la media o valor esperado de la distribución del VPN y se traduce como la ganancia esperada del escenario evaluado, en un horizonte de tiempo.
- ✓ El Factor de Riesgo, está representado por la desviación estándar de la distribución del VPN e informa sobre que tan alejado del valor de rentabilidad esperado, puede estar el valor real del VPN, debido a la influencia de las múltiples incertidumbres que afectan el proceso de producción.
- ✓ La Eficiencia de la Inversión se obtiene de dividir la media o valor esperado del VPN entre la media o valor esperado del VPI y se traduce como la cantidad de pesos que se ganarán, por cada peso invertido en el plan de explotación.

La tabla 2 resume los resultados más importantes de la evaluación técnica económica realizados a 5 escenarios de incorporación de recursos y la figura 16 muestra la Matriz Tridimensional que apoya la jerarquización.

Escenarios de Incorporación de Recursos	Valor Presente de la Inversión	Eficiencia de la Inversión	Factor de Riesgo	Factor de Rentabilidad después de Impuestos
	Media VPI (MM Pesos)	Media (VPN / VPI)	DS VPN Despues Impuesto (MM Pesos)	Media VPN Despues Impuesto (MM Pesos)
Escenario 1	207,061.79	0.648	14,772.82	134,124.11
Escenario 2	206,988.46	0.645	14,645.11	133,581.50
Escenario 3	206,944.45	0.647	14,724.73	133,989.66
Escenario 4	206,544.78	0.638	14,701.23	131,877.37
Escenario 5	206,914.25	0.648	14,730.09	134,054.15

Tabla 2 – Resultados de la evaluación técnica económica realizados a 5 escenarios de incorporación de recursos

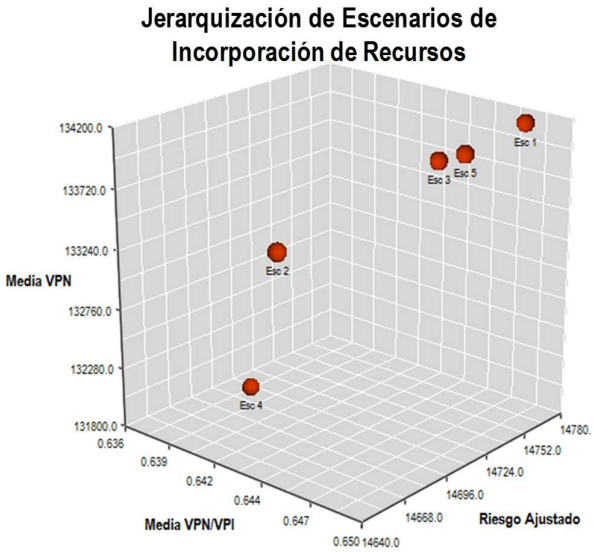

Figura 16 – Matriz Tridimensional de Jerarquización de Escenarios de Incorporación de Reservas.

REFERENCIAS:

1. Martz, H.F.;Walley, R.A. "Bayesian Reliability Analysis", John Wiley and Sons, NY, 1982.
2. Yañez, M.E – Semeco, K.L – Medina N.M – "Enfoque Práctico para la Estimación de Confiabilidad y Disponibilidad de Equipos, con base en Datos Genéricos y Opinión de Expertos" – Universidad Simón Bolívar - Venezuela 2005.
3. Modarres, M; Kaminsky, M; Kritsov, V. "Reliability Engineering And Risk Analysis". Marcel Dekker, New York,1999.
4. Yañez, M.E – Gómez de la Vega, H.A, Valbuena G, Ingeniería de Confiabilidad y Análisis Probabilístico de Riesgo – ISBN 980-12-0116-9 - Junio 2003.

5. Newendorp P.D; Schuyler J.R.: "Decision Analysis for Petroleum Exploration", 2da Edición, IBSN 0-9664401-1-1-0, Julio 2000.
6. Capen E.C., "The Difficulty of Assessing Uncertainty", SPE AIME, 1976
7. Megill R.E., "An Introduction to Risk Analysis", 2nd Edition, PennWell Publishing Company, Tulsa Oklahoma, 1984
8. Rose, Peter R., "Dealing with Risk and Uncertainty in Exploration" de 1987
9. Rose, Peter R.: The Business of Petroleum Exploration – AAPG Treatise of Petroleum Geology Handbook of Petroleum Geology, 1992
10. Peterson S.K., Murtha J.A., Schneider F.F., "Risk Analysis and Monte Carlo Simulation Applied to the Generation of Drilling AFE Estimates" – Paper SPE 26339, 1993.
11. Murtha J.A.: "Estimating reserves and Success for a prospect with geologically dependent layers" – Paper SPE 30040, 1995
12. Galli A., Armstrong M., Jehl B.: "Comparing Three Methods for Evaluating Oil Projects Option Pricing, Decision Trees, and Monte Carlo Simulations" – Paper SPE 52949/57894, 1999
13. Wang B., Kokolis G., Litvak L.B., Rapp W.J.: "Dependent Risk Calculations in Multile-Prospect Exploration Evaluations" Paper SPE 63198, 2000.
14. Falla L.C.,"Probabilistic Model To Develop Multilayer Gas and Oil Prospects", SPE 69614, 2001
15. Coordinating Committee for Offshore Prospecting in Asia,"Guidelines for Risk Assessment of Petroleum Prospects", 2001
16. "Guidelines for the Evaluation of Petroleum Reserves and Resources", a Supplement to the SPE/WPC Petroleum Reserves Definitions and the SPE/WPC/AAPG Petroleum Resources Definitions - ISBN 978-1-55563-105-5, 2001
17. Capen E.C., "A Consistent Probabilistic Definition of Reserves"; SPE Reservoir Engineering – 1996
18. "Petroleum Resources Management System PRMS", avalado por SPEE: Society of Petroleum Evaluation Engineers, SPE: Society of Petroleum Engineers, WPC: World Petroleum Council y AAPG: American Association of Petroleum Geologists. 2007