

LOS ÁRBOLES DE DECISIÓN COMO HERRAMIENTA PARA EL ANALISIS DE RIESGOS DE LOS PROYECTOS

Elena Maya Lopera
emayalop@eafit.edu.co

Universidad EAFIT
Maestría en Gerencia de Proyectos
Escuela de Administración y Negocios
2018

LOS ÁRBOLES DE DECISIÓN COMO HERRAMIENTA PARA EL ANALISIS DE RIESGOS DE LOS PROYECTOS.

Elena Maya Lopera
emayalop@eafit.edu.co

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título Maestría en
Gerencia de Proyectos

Asesor: Jhon Miguel Díez Benjumea

Universidad EAFIT
Maestría en Gerencia de Proyectos
Escuela de Administración y Negocios
2018

Contenido

Resumen.....	8
1. Introducción	11
2. Historia:.....	12
3. Árboles de decisión:.....	14
4. Aplicaciones y usos de los árboles de decisión:	16
5. Notación:.....	18
6. El análisis de los árboles de decisión:	24
7. Aplicación en proyectos:	28
8. Precision Tree para la solución y análisis de árboles de decisión	41
9. Conclusiones	80
10. Referencias	82

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Notación de un árbol de decisión.	19
Tabla 2. Resumen. Ejemplo 2 Árboles de decisión.....	27
Tabla 3.Resumen. Ejemplo 4.....	43
Tabla 4. Resumen estadístico. Ejemplo 4. Resultado Presicion Tree.....	61

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Estructura de un árbol de decisión.....	19
Ilustración 2. Ejemplo cualitativo de un árbol de decisión.	20
Ilustración 3. Estructura de probabilidad bayesiana	22
Ilustración 4. Estructura de probabilidad bayesiana. Ejemplo 1.....	23
Ilustración 5.Árbol de decisión Ejemplo 2.	27
Ilustración 6.Árbol de decisión final. Ejemplo 2.	28
Ilustración 7.Análisis cualitativo de los riesgos)	32
Ilustración 8.Análisis cuantitativo de los riesgos	32
Ilustración 9.Primer parte del árbol de decisión Ejemplo 3.....	38
Ilustración 10. Análisis por árbol de decisión de evaluación de un experto. Ejemplo 3.....	38
Ilustración 11. Árbol decisión final. Ejemplo 3.	40
Ilustración 12.Crear un árbol de decisión. Ejemplo 4.	43
Ilustración 13. Nombrar un árbol de decisión. Ejemplo 4.	44
Ilustración 14.Crear un nodo de decisión o azar. Ejemplo 4.	45
Ilustración 15.Resultado de primera decisión. Ejemplo 4.....	45
Ilustración 16.Segundo nodo de decisión. Ejemplo 4. 46	
Ilustración 17.Resultado segundo nodo de decisión. Ejemplo 4	47
Ilustración 18.Primer nodo de probabilidad. Ejemplo 4. 48	
Ilustración 19.Resultado primer nodo de probabilidad. Ejemplo 4.	49
Ilustración 20.Segundo nodo de probabilidad. Ejemplo 4.	50
Ilustración 21.Resultado segundo nodo de probabilidad. Ejemplo 4.....	50
Ilustración 22.Tercer nodo de probabilidad. Ejemplo 4.	51
Ilustración 23.Resultado tercer nodo de probabilidad. Ejemplo 4.	52
Ilustración 24.Tercer nodo de decisión. Ejemplo 4.....	52
Ilustración 25. Resultado Tercer nodo de decisión. Ejemplo 4.....	53
Ilustración 26.Cuarto nodo de decisión construcción grande. Ejemplo 4.	53

Ilustración 27.Cuarto nodo de decisión construcción pequeña. Ejemplo 4.	54
Ilustración 28.Resultado Nodo “Sin estudio de mercado”. Ejemplo 4.	54
Ilustración 29.Nodo de decisión “información desfavorable”. Ejemplo 4.	55
Ilustración 30. Nodo de decisión “información desfavorable” para construcción “grande”. Ejemplo 4.....	56
Ilustración 31.Resultado nodo de decisión “información desfavorable” para construcción “grande”. Ejemplo 4.	56
Ilustración 32.Nodo de decisión “información desfavorable” para construcción “Pequeña”. Ejemplo 4.	57
Ilustración 33.Resultado nodo de decisión “información desfavorable” para construcción “Pequeña”.	57
Ilustración 34.Árbol de decisión Ejemplo 4.....	58
Ilustración 35.Análisis perfil de riesgos Ejemplo 4.	59
Ilustración 36. Perfil de riesgos Ejemplo 3.	59
Ilustración 37. Árbol óptimo Ejemplo 4. Resultado Presicion Tree.....	62
Ilustración 38. Árbol de decisión. Ejemplo 5.....	65
Ilustración 39. Árbol óptimo. Ejemplo 5.....	66
Ilustración 40. Análisis de decisión una dirección. Ejemplo 5..	67
Ilustración 41. Elección entradas análisis de sensibilidad en una dirección. Ejemplo 5.....	68
Ilustración 42.Variación entradas análisis de sensibilidad en una dirección. Ejemplo 5.....	69
Ilustración 43. Elección entradas análisis de sensibilidad en una dirección. Ejemplo 5.	69
Ilustración 44. Análisis de sensibilidad en dos direcciones. Ejemplo 5.	73
Ilustración 45. Elección entradas análisis de sensibilidad en dos direcciones. Ejemplo 5.	74
Ilustración 46. Asignar distribución con @Risk Ejemplo 5.	76
Ilustración 47. Asignar valores a una distribución con @Risk. Ejemplo 5.....	77
Ilustración 48. Asignar salidas distribución con @Risk. Ejemplo 5..	77

Ilustración 49. Confirmar salidas @Risk. Ejemplo 5.....	78
Ilustración 50. Simulación Montecarlo con @Risk Ejemplo 5.	78
Ilustración 51. Ejecución Montecarlo con @Risk Ejemplo 5.	79
Ilustración 52. Resultado simulación Montecarlo con @Risk Ejemplo 5.	79

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1:Gráfico de probabilidad Ejemplo "Comida Rápida".....	60
Gráfico 2: Gráfica acumulativa Ejemplo "Comida Rápida"	61
Gráfico 3: Gráfica de sensibilidad Ejemplo 5 "Petróleo"	70
Gráfico 4: Gráfica de estrategia Ejemplo 5 "Petróleo".....	71
Gráfico 5: Gráfica de Tornado Ejemplo 5 "Petróleo"	71
Gráfico 6: Gráfica de araña Ejemplo 5 "Petróleo"	72
Gráfico 7: Gráfica 3D Análisis de sensibilidad en dos direcciones Ejemplo 5 "Petróleo"	75
Gráfico 8:Gráfica región de estrategia Análisis de sensibilidad en dos direcciones Ejemplo 5 "Petróleo"	75

Resumen

Los árboles de decisión son una herramienta muy útil a la hora de elegir entre varias alternativas, cuando estas son escalonadas, es decir, que los resultados (positivos o negativos) dependen de una decisión tomada anteriormente. Independiente del área en la que se use, esta herramienta facilita la visualización y el análisis de las decisiones, probabilidades y resultados de las diferentes alternativas, todo esto con el fin de poder tomar la mejor decisión. Aunque este método se puede usar en diferentes ámbitos laborales, resulta interesante lo útil que pueden llegar a ser para el análisis de riesgos y la gestión de proyectos, generalmente en proyectos de inversión, que son en los que se tienen diferentes decisiones y hay cierta incertidumbre en los resultados finales.

En el desarrollo de este trabajo, se presentará un contexto histórico de la herramienta, se comentará en qué áreas se ha usado, para la toma de decisiones y por último se describirá su utilidad en el análisis de riesgos en proyectos, indicando características, notación, formas de uso, ejemplo de análisis cualitativo y varios ejemplos cuantitativos, mostrando también cómo usar el Software Precision Tree para la construcción y análisis de los árboles de decisión.

Palabras clave:

Riesgo, análisis de riesgos, árboles de decisión, Guía del PMBOK®, sensibilidad.

Abstrac

Decision trees are a very useful tool when you have to choose between several alternatives, much more if they are staggered, that is, the results (positive or negative) depend on a decision which are made previously. Independent of the area in which it's used, this tool facilitates the visualization and analysis of the decisions, probabilities and results of the different alternatives, all of this in order to be able to make the best decision. Although this method can be used in different environments, it's interesting how useful they can be for risk analysis and project

management, there're where someone have to choose between different's decisions and theres some uncertainty in the final results.

In this work, we'll present a historical context of the desicion trees, we'll comment on what areas have been used and finally we'll describe it's usefulness in the projects risk analysis, indicating characteristics, notation, forms of use, example of qualitative analysis and several quantitative examples, also we'll showing how to use the Precision Tree Software for the construction and analysis of decision trees.

Key words:

Risk, Risk Analysis, Decisión Tree, Project, PMBOK®, Sesibility Analysis

1. Introducción

Constantemente nos enfrentamos a situaciones en las cuales debemos resolver un problema o una necesidad por medio de la toma de decisiones, donde después de analizar diferentes alternativas y dependiendo de los resultados de cada una de ellas, debemos elegir la mejor opción, para después, tomar otra decisión a partir de esta. A esto, se le llama decisiones escalonadas; en dichos casos es de vital importancia contar con herramientas que faciliten la visualización y análisis de cada una de las decisiones y sus consecuencias.

Cuando las decisiones descritas se pasan al ámbito de proyectos, se hace más creciente la necesidad de contar con metodologías y herramientas para la toma de decisiones o análisis de diferentes alternativas. Los árboles de decisión resultan de gran utilidad a la hora de analizar los riesgos de los proyectos, ya que permiten ver qué pasaría en un futuro si se toma una decisión y se obtiene alguno de los posibles resultados. Debido a la incertidumbre y a la cantidad de ramificaciones o alternativas que podemos llegar a tener en un proyecto, en el análisis de este por medio de árboles de decisión, se incluye el PMBOK®¹ como una de las técnicas del análisis cuantitativo de riesgos (Hulett, 2006).

Los árboles de decisión entregan como resultado la posibilidad de identificar cuál es la mejor opción en el desarrollo de un nuevo proyecto o producto, que sea un balance entre lo que se tenía en un principio y la nueva decisión. Todo esto mostrado de forma gráfica y amigable para los implicados en el proyecto, y con cifras que indican el valor máximo esperado, lo que facilita un poco la decisión a tomar.

¹ PMBOK: La Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyecto, Es una norma americana para la gestión de proyectos ha sido incorporada como parte del conjunto de normas de la American National Standard con la denominación ANSI/PMI 99-001-2004.

Los árboles de decisión son usados también en el cálculo del modelo de opciones reales para el análisis financiero del proyecto, en este trabajo se revisarán ejemplos de análisis de decisiones y riesgo bajos de incertidumbre, por lo que no se profundizará en la utilidad de los árboles en el análisis de Opciones reales, ya que este método es tan detallado y completo que debería tratarse por aparte para una mejor comprensión del modelo.

2. Historia

El uso de los árboles de decisión se remonta a 1944 por una idea de Von Neumann (1903-1957) utilizada en la teoría de juegos, tal como nos cuentan en su artículo Carlota Gastaldi, Marcel Urrea y Pedro Fernández de Córdoba, Neumann recomienda trazar un diagrama en forma de árbol donde se puedan ver todas las diferentes formas de jugar y descubrir un mejor modo de hacerlo, en donde se obtenga un resultado satisfactorio, incluso él (Neumann) nos ilustra claramente el uso de esta herramienta con el ejemplo de cómo lograr que dos niños se sientan satisfechos al darles un trozo de pastel y que ninguno de los dos reproche por tener el trozo más pequeño, en este caso, obtener la porción más grande del pastel depende de la manera en la que el primer niño corta el pastel y de la porción que elija el otro, por lo que es fundamental que cada niño sea capaz de prever lo que el otro va a hacer (Gastaldi, Urrea, & Fernández de Córdoba, 1998).

Después, en 1950 como nos cuenta Matsudo en su artículo: “Árboles de decisión, una técnica de data meaning”, gracias a un trabajo realizado por Hoveland y Hunt se plantea que esta herramienta sea usada para un conjunto de entrenamiento T en el ámbito de la informática, allí se dio a conocer que los árboles de decisión son de gran y múltiple utilidad (Matsudo, 1991). Aunque generalmente en esa época el enfoque de estos era usado en temas estadísticos, desde 1964 se empezó a usar

en la solución problemas de inversión y poco después para el análisis de riesgos y proyectos (Vélez, 2003).

Aunque el enfoque de árboles de decisión ha sido usado generalmente dentro del contexto de la teoría de la probabilidad, Magee fue el primero en utilizar el concepto para tratar el problema de las decisiones de inversión de capital y posteriormente Hespos y Strassmann propusieron, con algún detalle, combinar el análisis del riesgo, propuesto por Hertz y Hillier, con la técnica de los árboles de decisión (debe aclararse que Magee había previsto la combinación de estos enfoques cuando planteó la utilización de los árboles de decisión). Por su parte, en 1968, Raiffa desarrolló en forma detallada y muy clara la teoría de la decisión, donde se incluye la técnica propuesta por Magee y en general todo lo relacionado con las decisiones bajo riesgo. (Vélez, 2003, pág. 323).

En 1979 Mark Rubinstein, John Cox y Stephen Ross proponen los árboles binomiales (A veces llamados mallas binomiales) como un método para el análisis y valoración de opciones para el estudio financiero de proyectos de inversión, que es usado en modelos como Opciones reales (Rozo, 2018). Donde se considera que la evolución de precio, solo puede tomar dos posibles valores, analizando los posibles precios con el valor presente neto.

Constantemente desarrollan métodos y herramientas para el análisis, interpretación y simulaciones de árboles de decisión, tanto para la toma de decisiones como para análisis financiero. Con los avances tecnológicos se ha podido avanzar una utilidad para este análisis, ya que desde el 2010 aproximadamente, se comienza a hablar de los modelos binomiales y las opciones reales para la evaluación de proyectos de innovación (ya no solo es inversión y análisis de riesgos) (Vedoboto & Diego, 2015)

3. Árboles de decisión

A la hora de tomar decisiones de cualquier tipo, el profesor Felipe R. Mangani (2015) en sus diapositivas nos muestra una herramienta útil para tomar una decisión “La matriz de decisión es muy útil para aplicar en la resolución de situaciones de decisión únicas, según el criterio de decisión utilizado” (Mangani, 2015, pág. 5). Pero si en la situación en la que nos encontramos tiene decisiones encadenadas o condicionadas, podemos usar otra herramienta un poco más útil, como lo son los árboles de decisión, el mismo profesor Mangani, en su presentación nos indica para qué es útil esta herramienta “Cuando se presentan problemas de decisión “Secuenciales” o “encadenadas” (Alternativas con consecuencias que derivan en nuevas decisiones, inmediatas y también a más largo plazo), la representación gráfica mediante el ordenamiento de un árbol resulta más provechosa para optar por la mejor solución” (Mangani, 2015, pág. 7).

Un árbol de decisión es, para quien va a tomar la decisión, un modelo esquemático de las alternativas disponibles y de las posibles consecuencias de cada una, su nombre proviene de la forma que adopta el modelo, parecido a la de un árbol. El modelo está conformado por múltiples de nodos cuadrados que representan puntos de decisión y de los cuales surgen ramas (que deben leerse de izquierda a derecha), que representan las distintas alternativas, las ramas que salen de los nodos circulares, o causales, representan los eventos. La probabilidad de cada evento, $P(E)$, se indica encima de cada rama, las posibilidades de todas las ramas deben sumar 1.0. (Krajewski & Ritzman, 2000, pág. 76).

Muchas situaciones en las que tenemos que tomar decisiones escalonadas o secuenciales que son determinadas por situaciones futuras, son aptas para analizar mediante árboles de decisión (Arteaga, Rodriguez Ricardo; Zapatero, Rodriguez Miguel A; Lopez, Jimeno Carlos; Camara, Rascon Angel y otros , 1997). El uso de esta herramienta siempre puede ser una buena opción y de gran importancia

cuando se habla del análisis o gestión del riesgo de cualquier tipo de proyecto, ya que se alimenta de experiencias y estadísticas con las que al final se puede llegar a una alternativa que balancee el riesgo y beneficio de las acciones o planes a realizar en un proyecto o a una lluvia de ideas para resolver una necesidad o un problema. Esta estructura (los árboles de decisión) permite estimar los costos, riesgos, consecuencias, probabilidades y demás factores que afectan el proyecto, lo que ayuda a construir un caso de negocio completo para tomar una decisión donde se obtengan ganancias (Corpxcoach, 2013).

Según Hernández (2015) existen diferentes tipos de árboles de decisión, que son catalogados según la situación y el resultado deseado, él los cataloga en los siguientes tipos:

1. Árbol de clasificación o binario: se usa cuando hay varias alternativas que se han calculado anteriormente para obtener resultados más predecibles, para hacer uso de estos, hay que trazar esquemas binarios y proyectar las diferentes variables o ramas del árbol, gracias a las probabilidades de estas se puede predecir un poco el resultado. Es usado en probabilidad, estadística y minería de datos.
2. Árbol de regresión: este tipo de árbol ayuda a determinar un único resultado ya que se tiene la información necesaria para identificar una “ruta” óptima. Cuando se construye este árbol se divide la información en secciones o subgrupos. Este tipo de árbol es muy usado en bienes raíces.
3. Árbol de mejora: es usado cuando se desea tener un resultado más preciso; el árbol se construye, luego se toma una variable, esta se calcula y se estructura para reducir la incertidumbre y los errores a la hora de tomar decisiones. Este árbol es usado en contabilidad y matemática.
4. Árboles mixtos entre regresión y clasificación: es usado para prever un resultado con variables impredecibles, generalmente se usan indicadores

que muestren lo que ya ha sucedido en un pasado (Sesgando un poco el resultado), Se usa generalmente en ciencia (Castellanos, 2017)

5. Árboles de binomiales y trinomiales: son árboles donde cada rama es en sí un modelo binomial su función es recrear el modelo binomial varias veces en el tiempo suponiendo que el precio o costo de un elemento sube o baja con el tiempo. Estos árboles son muy usados en la aplicación de opciones reales.

4. Aplicaciones y usos de los árboles de decisión

Los árboles de decisión son muy usados en diferentes ámbitos de la vida en los que tengamos que tomar decisiones de cualquier tipo, como dice el Intaver institute en uno de sus artículos, cualquier persona puede usar rutinariamente los árboles de decisión, ya el análisis y lo útil de la herramienta depende de la consecuencia positiva o negativa de cada una de las alternativas; por ejemplo:

- Jurídica: esta herramienta puede ser usada en la toma de decisiones de un abogado sobre demandar o no demandar, en ir o no a juicio, teniendo en cuenta la probabilidad de ganar el juicio y lo que implica monetariamente y probabilística ganar o no el caso (Intaver Institute Inc.).
- Administración de operaciones (OM)²: se usan los árboles de decisión en la planificación de productos y administración de procesos o capacidad, en el ámbito de OM este método es valioso, ya que permite evaluar diferentes alternativas de expansión cuando hay problemas de capacidad o cuando la demanda es incierta y también cuando hay involucrada más de una decisión (Krajewski & Ritzman, 2000).

² OM: Administración de operaciones del inglés Operation Managenent.

- Minería de Datos (DM)³: Los árboles de decisión son usados en este ámbito abordando problemas como predicción, clasificación y segmentación de datos con el fin de convertirlos información valiosa para el análisis y toma de decisiones. Logar una buena minería de datos depende de algoritmos, algunos más y otros menos sofisticados que se aplican a los árboles de decisión para obtener la respuesta la información óptima de los datos. (Witten & Eibe, 20015)
- Medicina: En el ámbito de la medicina esta herramienta ha sido usada por más de dos décadas y es de vital importancia en casos de análisis genéticos o a la hora de tomar una decisión de si operar o no un paciente que llega a urgencias o incluso la posibilidad de que una persona desarrolle un efecto adverso a una medicina según su predisposición genética, estos árboles de decisión son del tipo clasificación (Bouza & Santiago, 2013).
- Esta herramienta también es muy usada en proyectos de inversión como lo cuenta en su libro Raúl Coss Bu, “El enfoque de los árboles de decisión, una técnica muy similar a programación dinámica es un método conveniente para representar y analizar una serie de inversiones hechas a través del tiempo” (Coss, 2015, pág. 253). Para los proyectos de inversión, también nos aclara que esta herramienta por sí sola no nos indica la mejor opción, para esto el usuario debe conocer las alternativas, variables y probabilidades, es decir, no se le puede escapar ningún detalle, lo que en algunos casos requiere de mucha información y tiempo de construcción.
- Tecnología e Inteligencia Artificial (IA): es usada para la parametrización y desarrollo de aplicaciones con el fin de indicarle a un programa cómo “Comportarse”⁴ frente a una situación que se le presente. El manejo de datos

³ DM: Minería de datos por sus siglas en inglés (Data Mining).

⁴ Cuando se habla da comportamiento de un programa se está haciendo semejanza a como pensaría un ser humano en el momento de tomar esa decisión o qué variables tiene en cuenta al momento de analizar qué decisión tomar.

por medio de Inteligencia Artificial se hace además por medio de algoritmos, basados en reglas que sirven para representar una serie de condiciones que ocurren de forma sucesiva, como se esperaría que lo hiciera un humano.

- Valoración de opciones reales: este tipo de árboles es usado en el análisis financiero de proyectos con una perspectiva estratégica, evaluando alternativas futuras como: Abandono del proyecto, expansión en caso en el que los resultados superen lo esperado, aplazamiento de la inversión o suspensión del proyecto para evitar flujos de caja negativos, dependiendo del comportamiento de una variable en el tiempo. Este método, tiene como ventaja sobre otros, que permite calcular el comportamiento financiero mínimo hasta la finalización del proyecto y no solo por un periodo limitado

Adicional a las aplicaciones anteriormente descritas,

“(…) por su estructura son fáciles de comprender y analizar; su utilización cotidiana se puede dar en diagnósticos médicos, predicciones meteorológicas, controles de calidad, y otros problemas que necesiten de análisis de datos y toma de decisiones”, lo que quiere decir que los árboles de decisión pueden ser usados en cualquier ámbito sin importar que sea laboral o personal, siempre y cuando implique toma de decisiones con cierto grado de incertidumbre (Calancha Zuniga, Carrión Bárcena, Cori Vargas, & Villa Torres, 2010, pág. 2).

5. Notación

Los árboles de decisión constan de: nodos de decisión representados por un cuadrado, nodos de probabilidad representados por un círculo y ramas o alternativas representadas por líneas o una línea cruzada por otras dos, para notar que es una decisión rechazada. Al momento de diseñar y analizar un árbol de decisión, se debe tener en cuenta la notación anteriormente descrita y que se puede apreciar en la tabla 1.

entendimiento identificar cuáles son las interacciones entre las decisiones y los eventos que surgen de esas decisiones. En la ilustración 2 podemos ver un árbol de decisión donde se debe elegir entre 4 posibles alternativas, estas salen del primer nodo de decisión nombradas como D1, D2, D3 y D4. Los resultados que pueden salir de las diferentes decisiones tomadas son nombrados como R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7 y R8 y sus probabilidades son P1, P2, P3...P8.

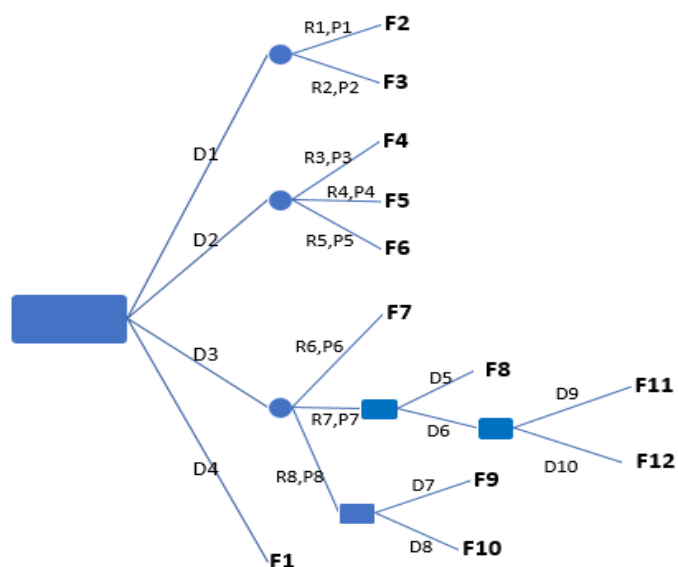


Ilustración 2. Ejemplo cualitativo de un árbol de decisión.

Fuente: Elaboración propia, 2018

Si se elige la Decisión 4 (D4) se conoce con seguridad cuál es su resultado final para esa alternativa que es mostrado como F1. Para las decisiones D1, D2 y D3 el resultado dependen de una probabilidad, los resultados R1, R2, R3, R4, R5 y R6 asociados a sus respectivas probabilidades, generan unos resultados finales con cierta certidumbre que son F2, F3, F4, F5, F6 y F7 (Para el resultado *n* asociado a la probabilidad *n*). Sin embargo, para los resultados R7 y R8 se debe tomar otra decisión, así, del resultado 7 (R7) hace que se deba elegir entre las decisiones D5 Y D6, mientras que con el resultado 8 (R8), se debe tomar una decisión entre D7 y D8.

A veces, un nodo de decisión lleva a tomar otra decisión inmediatamente, sin necesidad de ver una probabilidad asociada a una decisión, como lo que ocurre después de tomar la decisión 6 (D6), que después de tomar una decisión se debe tomar una decisión entre D9 y D10. Los resultados finales F8, F9, F10, F11 y F12 son resultados de las decisiones tomadas en D5, D7, D8, D9 y D10 respectivamente (Amaya, 2010).

La fórmula básica de la probabilidad condicional, cuando se tiene “dependencia” de una decisión debido a otra, es llamada Teorema de Bayes, esta, que se presenta a continuación, ayuda a encontrar la probabilidad de un suceso X dado a que haya ocurrido un suceso Y, lo cual, es un comportamiento característico de los árboles de decisión, entonces el cálculo del valor esperado en cada rama se realiza a partir de la fórmula del teorema de Bayes. Este es aplicable en todos los casos en los que haya incluida una decisión con probabilidad de ocurrencia de otra (Walpole, Myers, Myers, Ye , 2012).

$$P(X/Y) = P(X \cap Y)/P(Y)$$

Para el teorema de Bayes, los sucesos X y Y son mutuamente excluyentes, eso quiere decir, que X y Y no pueden ocurrir juntos a la vez. Según eso y lo anteriormente explicado, el teorema de Bayes se conversa mucho con la herramienta de los árboles de decisión, ya que nos indica cómo calcular las probabilidades de las ramas y multiplicándolo por los beneficios y/o pérdidas y por las probabilidades condicionadas, se puede obtener el Valor esperado de cada rama. En la siguiente ilustración se muestra cómo calcular las probabilidades en un árbol de decisión (Shao, 1978).

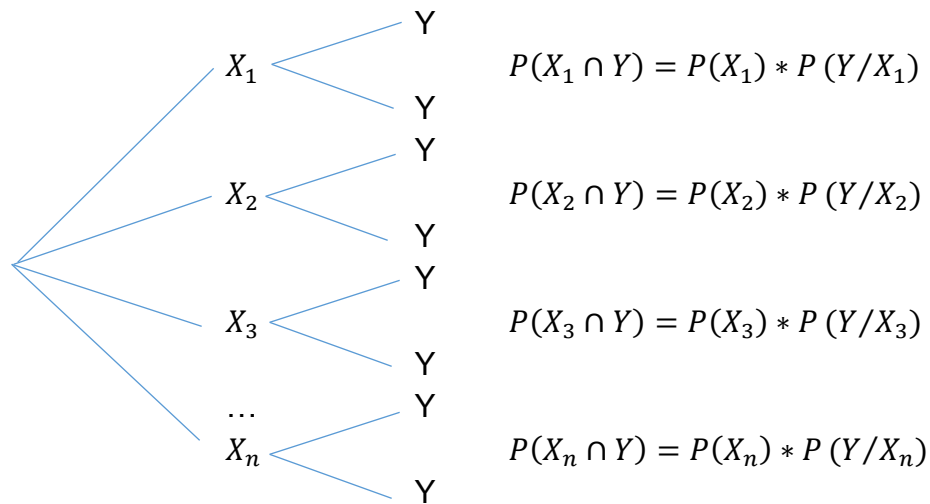


Ilustración 3. Estructura de probabilidad bayesiana.

Fuente: Elaboración propia, 2018

Quedando entonces:

$$P(X/Y) = \frac{P(X_1 \cap Y)}{P(Y)}$$

$$P(X/Y) = \frac{P(X_1) * P(Y/X_1)}{P(Y)}$$

Con la formula anteriormente descrita, se puede calcular la probabilidad de ocurrencia de cierto nodo específico de un árbol de decisión (Mesa, Rivera, & Romero, 2011). A continuación, un ejemplo sencillo donde se muestra cómo calcular la probabilidad de un nodo.

Ejemplo 1. Uso del teorema de Bayes:

Una fábrica produce 400 sillas diarias, la máquina A produce 250 sillas, pero un 4% de las sillas salen defectuosas y la máquina B produce 150 sillas y un 2% defectuosas. ¿Qué probabilidad hay de elegir una silla defectuosa y que esta se haya producido en la máquina A?

1. Se crea un “árbol” para mostrar las posibles opciones, donde D es producto defectuoso y N es producto no defectuoso, en las ramas están las probabilidades, en las primeras, las que van a A y B son la probabilidad de que una silla sea producida en esa máquina y en las segundas, las que van de A y B a D y N, es la probabilidad de que esa máquina produzca una silla defectuosa o no defectuosa respectivamente.

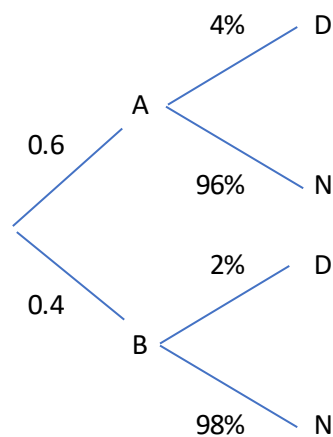


Ilustración 4. Estructura de probabilidad bayesiana Ejemplo 1.

Fuente: Elaboración propia, 2018

2. El primer cálculo que se hace es la probabilidad de que la silla defectuosa provenga de cada una de las máquinas:

Probabilidad de una silla defectuosa en la máquina A:

$$P(A \cap D) = P(A) * P(D/A); \quad P(A \cap D) = 0.6 * 0.04 = 0.025$$

Probabilidad de una silla defectuosa en la máquina B

$$P(B \cap D) = P(B) * P(D/B); \quad P(B \cap D) = 0.4 * 0.02 = 0.0075$$

3. Luego se calcula la probabilidad de que salga una silla defectuosa, sin importar de qué máquina proviene, lo que se obtiene sumando $P(A \cap D)$ y $P(B \cap D)$

$$P(D) = P(A \cap D) + P(B \cap D)$$

$$P(D) = 0.025 + 0.0075$$

$$P(D) = 0.033$$

4. Después se calcula la probabilidad de que la silla defectuosa venga de la máquina A:

$$P(A/D) = \frac{P(A \cap D)}{p(D)} = \frac{0.025}{0,033} = 0.77$$

$$P(B/D) = \frac{P(B \cap D)}{p(D)} = \frac{0.0075}{0,033} = 0.23$$

La respuesta al ejemplo 1 es que la probabilidad de que la silla defectuosa sea sacada de la máquina A es 77% y que venga de la máquina B es de 23%. Pero la probabilidad de sacar una silla defectuosa entre toda la producción es de 3%.

En los árboles de decisión no solo se calcula la probabilidad de que un evento ocurra, adicional esto, se calcula el valor esperado de utilidad para cada rama, esto se hace multiplicando la probabilidad condicional (como se mostró en el ejemplo anterior) y el posible beneficio y/o costo de cada rama.

6. El Análisis de los árboles de decisión

La construcción de los árboles de decisión se hace de derecha a izquierda, mientras que su análisis es más simple si se hace de derecha a izquierda, dejando a un lado las que alternativas que no cumplan con el objetivo con el que se construye un árbol de decisión.

De acuerdo con Taha (2012) “Los Árboles de decisión deben incluir (1) las probabilidades asociadas con las ramas que emanan los eventos de la oportunidad

y (2) Los ingresos asociados con diversas alternativas del problema.” (Taha, 2012, pág. 514), lo que quiere decir, que los árboles de decisión deben incluir un nodo de decisión que es excluyente a las demás, pero también decisiones que dependen de una probabilidad de ocurrencia de un evento y a estos se les puede asociar un valor esperado para cada rama.

El análisis de los árboles de decisión se realiza en 5 Fases:

1. Definir y analizar el problema
2. Estructurar y dibujar el árbol, esto permitirá tener una visión amplia gráfica de la situación a la que se está enfrentando.
3. Asignar probabilidades en las ramas.
4. Calcular las ganancias o beneficio de cada una de las alternativas.
5. Resolver el problema calculando el valor esperado de cada nodo, esto se hace con el beneficio y la probabilidad de obtener los beneficios en cada nodo, en cada uno de ellos se debe elegir el valor esperado que genere mayor beneficio (Render, Satir, & Hanna, 2006).

Para mayor comprensión de cómo se hace un análisis de un árbol de decisión, se presenta el siguiente ejemplo.

Ejemplo 2. Nuevo producto:

Una empresa en crecimiento debe decidir entre sacar un nuevo producto (Decisión A) o rediseñar uno de sus productos (Decisión B). En caso de tomar la decisión A debe elegir entre desarrollarlo y venderlo nacionalmente con un costo de 85,000 dólares o venderlo regionalmente con un costo de 51,000 dólares. En caso de tomar la decisión B, debe elegir entre rediseñar un producto estrella para la empresa que representa una inversión de 27,000 dólares o uno débil, que no tiene muy buenas ventas y el cual no representa inversión. Para todas las opciones se tiene una

incertidumbre de aceptación del mercado, que puede ser: Fuerte, Moderada y Pobre.

La probabilidad de éxito al desarrollar un nuevo producto y venderlo nacionalmente con una aceptación fuerte es de 50%, para una aceptación moderada es de 30%, y una aceptación pobre de un 20%. Para el desarrollo de un nuevo producto y lanzarlo regionalmente con una aceptación fuerte del mercado es un 20%, para una aceptación moderada un 20% y una aceptación pobre de un 60%. Para estos casos, el valor esperado para una aceptación fuerte del mercado es 450.000 dólares, para una aceptación moderada 20.000 dólares y para una aceptación pobre es de 1,200 dólares.

La probabilidad para un rediseño de un producto estrella es 45% para una aceptación alta, para una aceptación moderada es de 30% y una aceptación pobre de un 25%. La probabilidad para un rediseño de un producto débil con alta aceptación de mercado es de 30%, para una reacción moderada un 20% y una reacción pobre de un 50%. Para estos casos, el valor esperado, si se tiene una aceptación fuerte del mercado, es de 300,000 dólares, para una aceptación moderada es 15,000 dólares y para una aceptación pobre es de 2,000 dólares.

Para entender mejor el panorama, se presenta la siguiente tabla:

Decisión 1	Decisión 2	Reacción del Mercado	Probabilidad	Valor esperado
Desarrollar un producto nuevo	Desarrollo detallado	Fuerte	50%	\$ 450,000
		Moderada	30%	\$ 20,000
		Pobre	20%	\$ 1,200
	Desarrollo rápido	Fuerte	20%	\$ 450,000
		Moderada	20%	\$ 20,000
		Pobre	60%	\$ 1,200
Rediseño de producto	Producto fuerte	Fuerte	45%	\$ 300,000
		Moderada	30%	\$ 15,000
		Pobre	25%	\$ 2,000
	Producto débil	Fuerte	30%	\$ 300,000
		Moderada	20%	\$ 15,000
		Pobre	50%	\$ 2,000

Tabla 2. Resumen Ejemplo 2 Árboles de decisión.

Fuente: Elaboración Propia, 2018.

Se crea un árbol de decisión donde al final de cada nodo está el valor esperado.

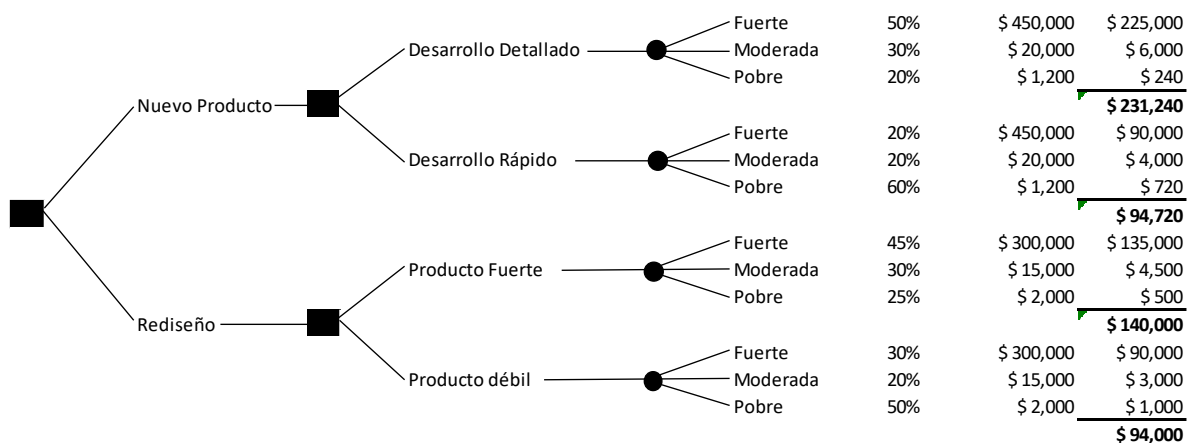


Ilustración 5. Árbol de decisión Ejemplo 2.

Fuente: Elaboración propia, 2018

Después se calcula para cada nodo el beneficio, teniendo en cuenta la inversión que se debe realizar en cada decisión, lo que nos deja con el siguiente árbol.

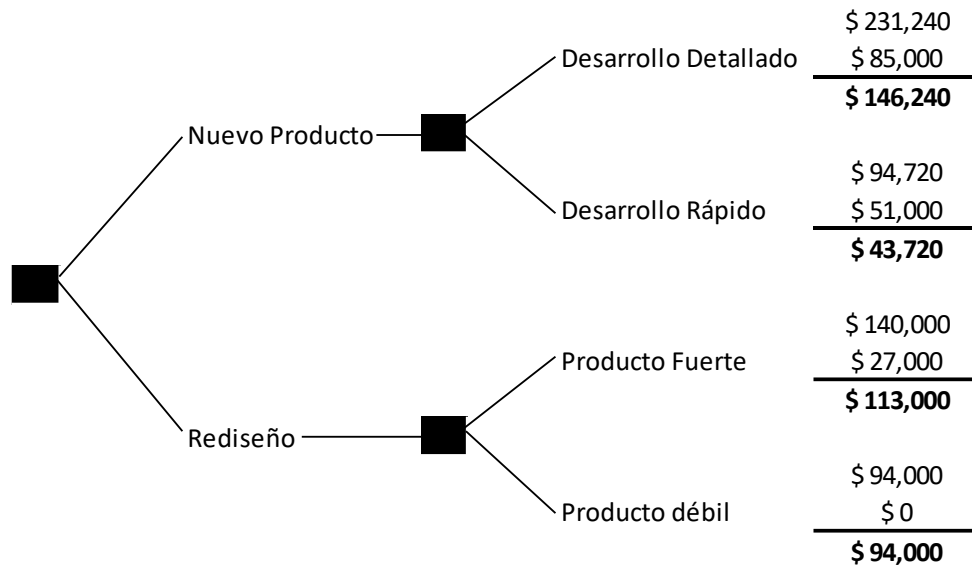


Ilustración 6. Árbol de decisión final Ejemplo 2.

Fuente: Elaboración propia, 2018

Después de evaluar los diferentes resultados se toma la decisión de desarrollar un nuevo producto detalladamente, ya que es la que más beneficios generaría.

7. Aplicación en proyectos

El PMBOK® define un proyecto como un esfuerzo temporal que se realiza para llegar a un objetivo.

Un proyecto es un esfuerzo temporal que se lleva a cabo para crear un producto, servicio o resultado único. La naturaleza temporal de los proyectos implica que un proyecto tiene un principio y un final definidos. El final se alcanza cuando se logran los objetivos del proyecto, cuando se termina el proyecto porque sus objetivos no se cumplirán o no pueden ser cumplidos, o cuando ya no existe la necesidad que dio origen al proyecto (Project Management Institute, Inc., 2013, pág. 3).

Para gestionar un proyecto se tienen 5 grupos principales, que son: Inicio, planificación, ejecución, monitoreo y control y cierre. Dentro de esos grupos se deben identificar los requisitos y entender la necesidad del usuario final, gestionar los interesados y gestionar restricciones; lo anteriormente descrito genera un desafío en la gestión de proyectos, ya que el equipo que trabajará en él, debe conocer los riesgos, evaluar la situación, gestionar capacidad y mantener una comunicación continua con los interesados en el proyecto (Project Management Institute, Inc., 2013).

Al gestionar proyectos, existen situaciones en las que se deben tomar decisiones, casi siempre basados en los análisis de riesgos. Para un proyecto el PMBOK® define qué riesgo es:

El riesgo de un proyecto es un evento o condición incierta que, de producirse, tiene un efecto positivo o negativo en uno o más de los objetivos del proyecto, tales como el alcance, el cronograma, el costo y la calidad. Un riesgo puede tener una o más causas y, de materializarse, uno o más impactos (Project Management Institute Inc., 2013, pág. 310).

Los riesgos individuales del proyecto no son lo mismo que el riesgo global de este. El riesgo global de un proyecto es la unión de sus riesgos individuales, lo que hace más complejo estudiarlos. En los proyectos, los interesados están dispuestos a asumir cierto nivel de riesgos, esta actitud frente al riesgo permite clasificar a los interesados en diferentes categorías: apetito de riesgo (grado de incertidumbre que se puede asumir para obtener un retorno), tolerancia al riesgo (cantidad de riesgo que se puede asumir) y umbral de riesgo (nivel máximo de incertidumbre e impacto que los interesados están dispuestos a asumir) (Project Management Institute Inc, 2013).

Los riesgos pueden ser positivos o negativos, que se traducen en fortalezas o amenazas respectivamente. Los riesgos positivos se pueden explotar, mejorar, compartir o aceptar; Los riesgos negativos se pueden mitigar, evitar, transferir o aceptar. Una vez se defina qué tipos de riesgos tiene un proyecto, las posibles causas y probabilidades, se debe realizar un plan de acción a tomar sobre el riesgo. Para realizar una gestión adecuada de riesgos, se deben seguir las siguientes etapas:

1. Planificar riesgos: en esta actividad se definen los posibles riesgos, se decide cómo abordarlos y cómo ejecutar las actividades para gestionar los riesgos en un proyecto.
2. Identificación de riesgos: Se determinan los posibles eventos que puedan ocurrir en el desarrollo del proyecto. En esta etapa se establece la importancia de que se materialice un riesgo. Para identificar los asociados a un proyecto específico, se debe revisar:
 - a. Actividades en escala de tiempo.
 - b. Componentes del proyecto, como lo son: personas, infraestructura, equipos, herramientas, entre otros.
 - c. Trato y relación con las accionistas o patrocinadores.
 - d. Impactos de otros proyectos sobre el que se está estudiando.
 - e. Cambios organizacionales que se den durante el proyecto.
 - f. Parámetros externos (políticos y económicos).
3. Evaluación de riesgos: se le da un peso a cada uno de los riesgos, según su importancia y gravedad de que ocurra y se hace una base para priorizar las acciones por medio de la probabilidad de ocurrencia y el impacto de cada uno de ellos. Esta evaluación permite cuantificar y priorizar el riesgo, existen diferentes herramientas para cuantificarlos como:
 - a. Valor esperado.
 - b. Funciones de probabilidad.

- c. Simulaciones.
 - d. Árboles de decisión.
 - e. Juicio de expertos.
4. Respuestas para gestionar los riesgos: se definen estrategias para aprovechar las oportunidades y disminuir las amenazas, con el objetivo de minimizar los errores y maximizar utilidades.
 5. Controlar los riesgos: consiste en implementar estrategias para responder a los riesgos.
 6. Monitoreo y evaluación: Seguimiento a las acciones implementadas para mitigar los riesgos, este monitoreo se debe hacer durante la duración del proyecto.

Una gran parte del proceso de gestión de riesgos en proyectos implica predecir un poco el comportamiento en un futuro, tratar de entender qué puede pasar con tiempo y al tomar una decisión y si es o no importante para el proyecto. Debido a esa incertidumbre y cantidad de ramificaciones o alternativas que podemos llegar a tener en un proyecto, el análisis de este por medio de árboles de decisión se incluye el PMBOK®⁵ como una de las técnicas del análisis cuantitativo de riesgos. (Hulett, 2006). En el capítulo 11 de éste libro, en la parte de análisis cuantitativo de riesgos junto con los análisis de sensibilidad, en la 5 versión del PMBOK® se puede ver que los árboles de decisión se usan para hallar la opción o alternativa óptima, que genera mayor beneficio, “Análisis del valor mínimo esperado” (...) “para un proyecto se calcula multiplicando el valor de cada posible resultado por su probabilidad de ocurrencia y sumando luego los resultados. Un uso común de este tipo de análisis es el análisis mediante árbol de decisiones” (Project Management Institute, Inc, 2013, pág. 336).

⁵ PMBOK: La Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyecto, Es una norma americana para la gestión de proyectos ha sido incorporada como parte del conjunto de normas de la American National Standard con la denominación ANSI/PMI 99-001-2004.

El PMBOK®, en las imágenes que se muestran a continuación (Imagen 1 y 2), ilustra cómo hacer el análisis cualitativo y cuantitativo de los riesgos, nos muestran cuáles son las entradas, las herramientas y las salidas, para cada uno de los casos, en la Ilustración 7 se puede ver como se realiza el análisis cualitativo de los riesgos y en la Ilustración 8 el análisis cuantitativo de los riesgos.

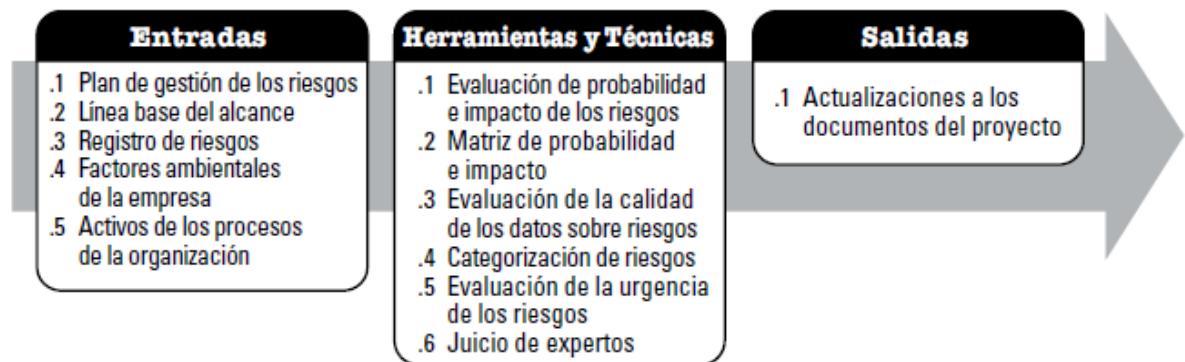


Ilustración 7.Análisis cualitativo de los riesgos

Fuente: (Project Management Institute inc, 2013, pág. 328)

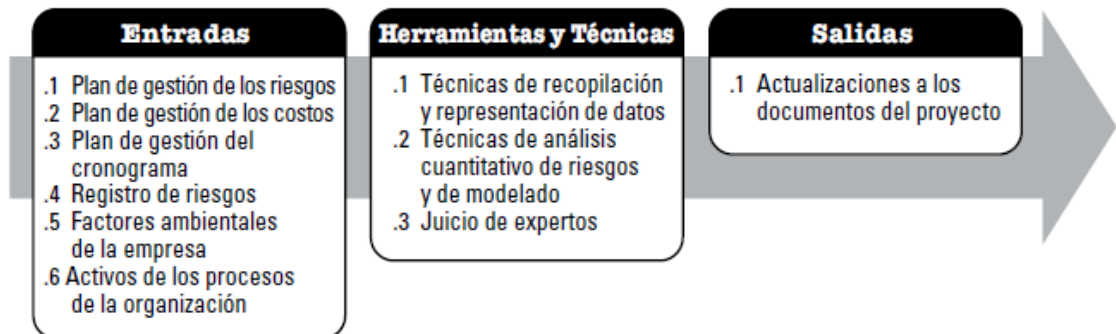


Ilustración 8.Análisis cuantitativo de los riesgos

Fuente: (Project Management Institute Inc, 2013, pág. 334)

Para el análisis de riesgos en los proyectos hay diferentes técnicas y herramientas, estos se pueden evaluar cualitativamente o cuantitativamente, y dependiendo de la complejidad y del tamaño del proyecto, se debe optar por una herramienta u otra.

Generalmente el análisis cualitativo se realiza cuando los proyectos son pequeños y no justifican invertir en un análisis profundo de riesgos, o cuando su incertidumbre es poca. El análisis cuantitativo de los riesgos se usa en proyectos más grandes y de mayor incertidumbre y es útil porque asigna un valor a los riesgos del proyecto y nos ayuda a tomar la mejor decisión cuando hay un alto grado de incertidumbre, sin embargo, este método también requiere un poco más de análisis y detalle que los cualitativos.

A continuación, se describen algunos métodos usados para el análisis de riesgos:

- a. Evaluación de probabilidad: estudia la probabilidad de ocurrencia de cada uno de los riesgos y el impacto que genera que se materialice alguno y se altere el cronograma, costos, calidad o alcance. A cada riesgo se le asigna una probabilidad de ocurrencia subjetivamente y un impacto (costo, tiempo, alcance). Los riesgos que estén en baja probabilidad e impacto se marcan para un futuro monitoreo, los que tengan una calificación más alta en probabilidad e impacto, se separan para planear como mitigarlos. De este análisis se construye una matriz de probabilidad e impacto, lo que permite priorizar los riesgos que se deben mitigar. Esto se debe hacer antes de que el proyecto inicie ya que, si todos los riesgos son altos, se debe repensar el desarrollar o no del proyecto (Project Management Institute Inc, 2013).
- b. Juicio de expertos o método Delphi: este método define la criticidad y priorización de los riesgos según el juicio de expertos en el tema que se analiza, consiste en 9 pasos que son: detección y formulación del problema, escoger el grupo de expertos, elegir equipo de la ejecución, formar equipo para supervisar, desarrollar cuestionario, solucionar cuestionario, análisis de resultados, realizar un segundo cuestionario combinando respuestas del primero, llegar a un acuerdo, cumplidos esos 8 pasos y después de analizar

cualitativamente el impacto, se decide cuáles mitigar y cuáles monitorear (Equipo Auditool, 2014).

- c. What if?: este método usa información específica del problema o proyecto a desarrollar y se hacen preguntas como si se hicieran diferentes procedimientos o escenarios para llegar al resultado e incluso se pregunta qué pasaría en caso de que algo saliera mal, esto para identificar los riesgos y las consecuencias de tomar una u otra alternativa. Lo primero que se realiza es definir el proyecto a analizar, luego se determinan los escenarios y posibles situaciones, después se determinan consecuencias y por último se recomiendan acciones correctivas (Leza, 2010).
- d. Simulaciones Montecarlo: es un modelo matemático donde se calcula muchas veces (el número de veces suficiente para tener una muestra representativa) el resultado del proyecto, asignando diferentes valores a variables; con los resultados de las diferentes iteraciones se hace un estudio estadístico del que salen conclusiones relevantes para el proyecto. El resultado es una distribución probabilística con todos los posibles resultados, que aporta un perfil riesgo/rentabilidad permitiendo tomar una decisión. (González, 2015).
- e. Análisis de sensibilidad: consiste en analizar la incertidumbre de cada elemento del proyecto y cómo afecta el resultado final, con este análisis se determinan cuáles son los principales riesgos que generan mayor impacto en el resultado final proyecto con el fin de analizarlos más a fondo y buscar la forma de mitigarlos. Este método también se puede simular, asignando valores a las diferentes variables (Una a una) y mirar cómo afecta el resultado final cada vez que la variable toma cierto valor (Fernández, 2011).

- f. Árboles de decisión: es un diagrama donde se representa una decisión bajo las diferentes implicaciones de la selección de una u otra alternativa. En las ramas del árbol se representan las probabilidades de riesgo y los beneficios (tomando costos o utilidades), en cada rama tenemos un valor esperado, lo que permite ver cuáles son las series de decisiones y/o alternativas que nos generan un mejor valor esperado (Aquino, 2014).

Además de los anteriormente descritos, hay muchos otros métodos para analizar los riesgos cuando se trabaja en proyectos, sin embargo, en todos, la efectividad de las decisiones tomadas va a depender de entender muy bien las alternativas y de saber usar el método que más se acomode al proyecto o metodología de trabajo.

Como se ha mencionado constantemente, los árboles de decisión pueden ser usados en diferentes ámbitos laborales, sin embargo, resulta interesante lo útiles que pueden llegar a ser para el análisis de riesgos y la gestión de proyectos. Los árboles de decisión son una herramienta de gran utilidad y efectiva a la hora de gestionar riesgos en los proyectos, ya que plantean claramente las opciones y probabilidades en un proyecto, ya sea que haya nacido de un problema o una necesidad, y permite que todas las opciones sean analizadas, también permiten tener en cuenta las consecuencias de las diferentes opciones, permiten poner cifras a los diferentes resultados y la probabilidad de que las consecuencias se materialicen, y por último, gracias a los análisis de lo anteriormente descrito, tomar la “mejor” decisión para el proyecto (Duverge, 2012).

La mayoría de gerentes de proyectos, cuando se enfrentan a un proyecto relativamente pequeño, creen que pueden hacer la elección de manera intuitiva y que no es necesario una herramienta, sin embargo, cuando se debe tomar una decisión que dependa de otras decisiones, aunque el proyecto sea pequeño, no es sano tomar la decisión intuitivamente, ya que puede conducir a errores; en esos

casos la mejor opción es tomar la decisión con ayuda de herramientas para la toma de decisiones, como pueden ser los Árboles de decisión (Intaver Institute Inc.).

Los proyectos de inversión ocupan gran parte de los proyectos que son analizados por esta herramienta, ya que es de gran ayuda que los implicados en el proyecto puedan visualizar gráficamente las alternativas y probabilidades, facilitando la percepción y comprensión de la estructura lógica y su alcance y significado. (Arteaga, et al., 1997) Como resultado de los árboles de decisión podemos identificar cuál es la mejor opción en el desarrollo de un nuevo proyecto o producto, que sea un balance entre lo que se tenían en un principio y el resultado de la decisión que se toma con el árbol.

Aunque el PMBOK® nos da a conocer diferentes herramientas para las diferentes fases de un proyecto y específicamente para el análisis de riesgos (Como se mencionó anteriormente) particularmente se tratará la técnica de Árboles de decisión, ya que este análisis hace parte de la fase de planificación de un proyecto, por lo que es importante desde las primeras fases conocer a que nos enfrentamos.

Un árbol de decisión inicia con un nodo de decisión (Generalmente es un cuadrado a la izquierda) a partir del cual se extienden diferentes ramas que representan las alternativas, cada rama finaliza con un nodo de azar y a partir de los diferentes eventos y probabilidades se pueden obtener los resultados de las diferentes alternativas. El ultimo resultado de la rama se expresa en términos económicos, que se generarán de la sumatoria de probabilidad por el costo y beneficio, indicando cuál es la opción que genera mayor valor esperado (Aquino, 2014).

A continuación, se presenta un ejemplo común en las empresas de producción en la que se simula un proyecto donde se debe tomar la decisión de comprar una u otra máquina, teniendo que decidir entre dos máquinas y una de estas tiene la opción de hacer un estudio con un experto para evaluar la condición en la que se encuentra.

El siguiente ejemplo se calculará manualmente, debido a que no es una decisión difícil de calcular y se identifica fácilmente la mejor alternativa.

Ejemplo 3. Invertir o no en una máquina

Arturo Betancur tiene una empresa metalmecánica y debe decidir entre comprar 2 máquinas láser para mejorar la tecnología de su empresa para cumplir la producción por los próximos 15 años. La máquina 1 tiene un costo de 400 millones de pesos y debe pagar mensualmente 15 millones, que incluyen mantenimiento y repuestos; mientras que la máquina 2 vale 500 millones de pesos, pero su mantenimiento es variable, podría costar 25 millones de pesos mensuales con una probabilidad de 20%; 15 millones de pesos anuales con una probabilidad de 40% o podría no costar, esta opción tiene una probabilidad de 40%.

Arturo antes de tomar la decisión, puede contratar un experto para evaluar la condición de la máquina 2, el experto le cobra 4 millones de pesos por su concepto. Él debe decir si la evaluación realizada a la máquina es satisfactoria (50% de probabilidad) o no (50% de probabilidad). Si la evaluación es Satisfactoria existe la probabilidad de un 60% de que el costo del mantenimiento anual sea de 0 pesos, el otro 40% corresponde a un costo de 15 millones de pesos anuales. Si la evaluación resulta no satisfactoria hay una probabilidad de 20% de que su mantenimiento anual no tenga costo, podría tener un costo de 15 millones de pesos en una probabilidad de 40% y de otros 40% de que el costo anual sea de 25 millones de pesos. ¿Qué decisión debe tomar Arturo?

La primera decisión se vería como se muestra en la ilustración 9, donde se tiene un primer nodo de decisión en el cual se debe elegir entre la máquina 1 y 2. Luego vemos un nodo de probabilidad (el círculo), al final se puede ver qué pasaría si no existieran las probabilidades (500, 725, 875). Para calcular el costo, ya incluida la probabilidad, se haría de la siguiente forma.

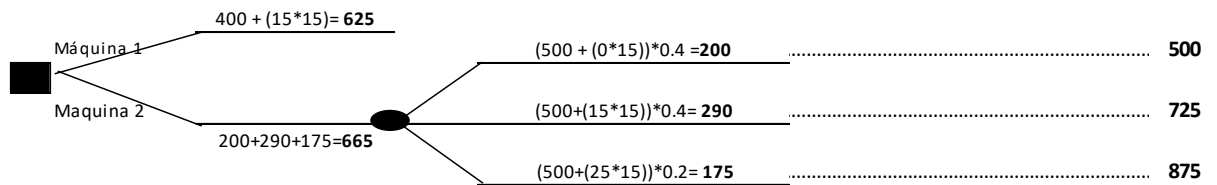


Ilustración 9. Primera parte del árbol de decisión Ejemplo 3.

Fuente: Elaboración propia, 2018

Para la máquina 1 se calcula el costo con la suma entre el costo de la máquina y el costo de mantenimiento de los 15 años. Para la máquina 2 se suma el resultado de calcular la probabilidad de cada una de las opciones para los 15 años, sumada al costo de la máquina.

En la ilustración 4 se muestra cómo se analizaría la decisión de llamar a un experto, como vemos, si Arturo decide contratar un experto para analizar la máquina 2 y termina comprando la máquina 1, debe pagar los 4 millones de pesos de la inspección de la máquina 2 y los 225 millones de mantenimiento durante los 15 años.

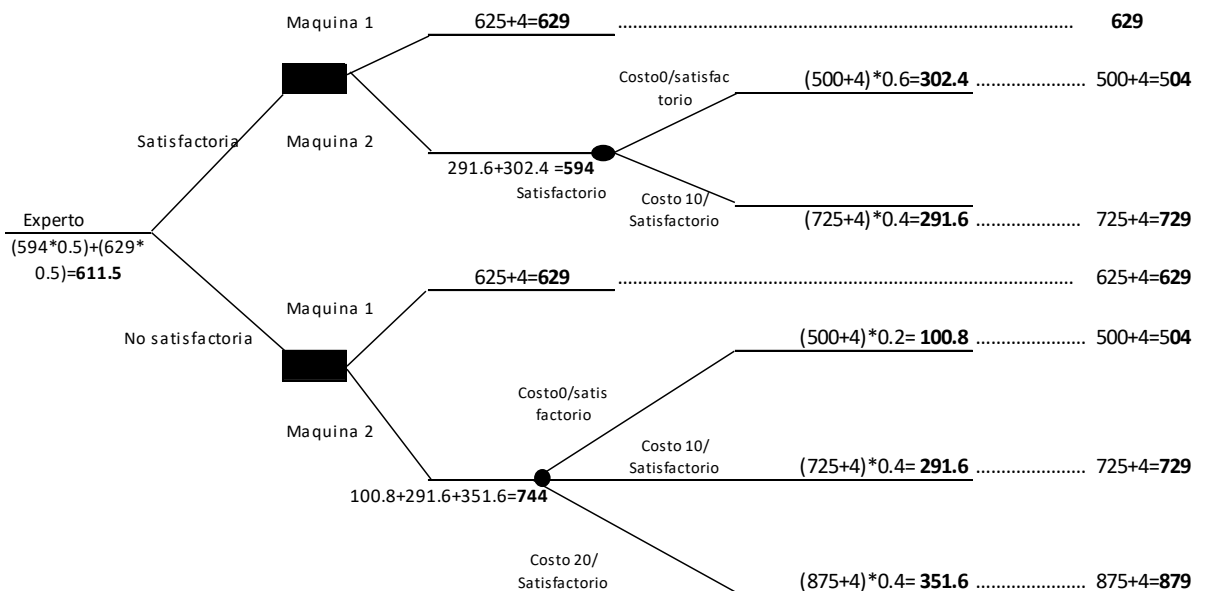


Ilustración 10. Análisis por árbol de decisión de evaluación de un experto Ejemplo 3.

Fuente: Elaboración Propia, 2018

Como se puede ver en la ilustración 10, para calcular el costo de la máquina 2 se multiplica el costo de la máquina más el mantenimiento de los 15 años y los 4 millones de la inspección por la probabilidad de que el mantenimiento cueste lo que la alternativa presenta, por ejemplo, para calcular el costo de la máquina 2, si el resultado es “no satisfactorio”, se realiza de la siguiente forma:

Costo de la máquina: 500 millones

Costo del experto: 4 millones

Costo del mantenimiento de 25 millones por los 15 años: $25 * 15 = 375$ millones

Costo de la máquina, calculado el promedio con el costo del experto: $(500+375+4) * 0,4 = 351.6$

Costo del mantenimiento de 15 millones por los 15 años: $15 * 15 = 225$ millones

Costo de la máquina calculado el promedio con el costo del experto: $(500+225+4) * 0,4 = 291.6$

Costo del mantenimiento de 0 por los 15 años: $0 * 15 = 0$ millones

Costo de la máquina calculado el promedio con el costo del experto: $(500+4) * 0,2 = 100.8$

Costo de la máquina 2, si la inspección no es satisfactoria: $100.8+291.6+351.6 = 424$ Millones. De manera similar se calcula el costo de la máquina 2 cuando el resultado del experto es satisfactorio. A continuación, el árbol de decisión completo y el análisis final del ejemplo:

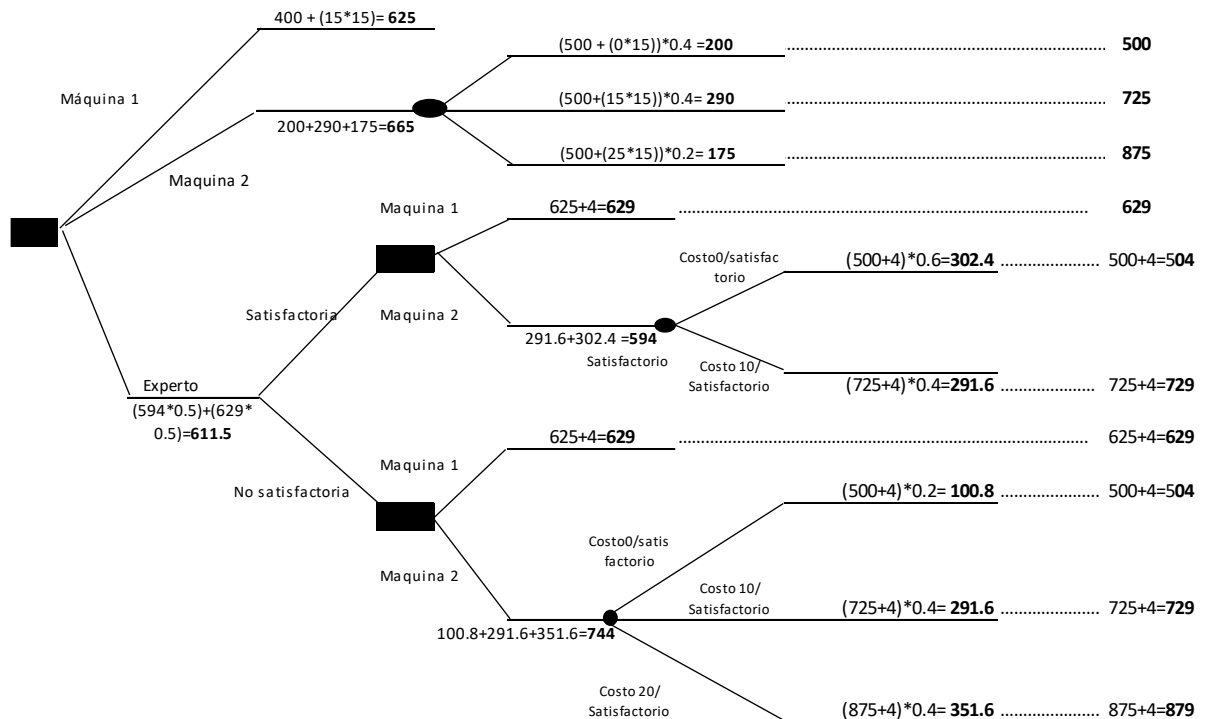


Ilustración 11.Árbol decisión final. Ejemplo 3.

Fuente: Elaboración Propia, 2018

La decisión a tomar es contratar el experto para la evaluación de la máquina, si el resultado es satisfactorio, se debe comprar la máquina 2; si el resultado del experto es no satisfactorio, se debe comprar la máquina 1; incluso teniendo en cuenta que el costo del experto se debe pagar.

Aunque la aplicación más clara de los árboles de decisión en proyectos es la toma de decisiones, cuando estas están bajo incertidumbre y el comportamiento futuro es incierto, como el que se ven en la valoración de los proyectos de inversión, se ve la necesidad de evaluar el proyecto por métodos no tradicionales, como el VPN (Valor Presente Neto), y evaluarlos por medio de un modelo que se llama opciones reales, que viene de la mano con los árboles de decisión.

8. Precision Tree para la solución y análisis de árboles de decisión

Hay diferentes softwares para realizar y analizar árboles de decisión, como lo son:

- Lucid chart: este software permite graficar muchos tipos de mapas como mapas mentales, diagramas Venn, flujos de proceso, árboles de decisión, entre otros, esta herramienta permite graficarlos, los análisis se pueden hacer por medio de tablas y cálculos, pero no permite hacer análisis de variables o simulaciones.
- DPL profesional: tiene un módulo para la construcción y análisis de árboles de decisión, este programa permite hacer simulaciones Montecarlo y análisis de rutas óptimas.
- Tree Age Pro: es un software que permite construir y analizar modelos en poco tiempo, puede ser usado en cualquier problema de toma de decisiones, incluye un módulo para árboles de decisiones, diagramas de influencia y simulaciones.
- Precisión Tree: permite graficar un árbol de decisión, hacer análisis de probabilidad, ruta óptima, análisis de sensibilidad y simulaciones con @ Risk, con la ventaja de que este es un complemento de Excel.

En este texto se analizará solo el Precision Tree (Análisis visual de decisiones para Microsoft Excel), ya que este software permite diagramar, organizar y analizar visualmente decisiones, usando árboles de decisión en Excel, que puede ser más familiar con los usuarios de los árboles de decisión. En la herramienta se identifica y calcula el valor de todas las posibles alternativas, Precision Tree determina cuál es la mejor opción en cada nodo, marcando la ruta óptima, permite también cambiar una o varias variables para recrear varios escenarios.

El siguiente ejemplo, en donde se debe decidir si invertir en un proyecto de un local de comida rápida o no, pero además se plantea la opción de construir el local grande o pequeño, dependiendo de un estudio de mercado, se solucionará por medio del software Precision Tree, indicando paso a paso cómo se construye un árbol de decisión y cómo se puede calcular la opción óptima.

Ejemplo 4. Local comida rápida

Se está planteando construir o no un local de comida rápida, y no se sabe si hacer una sección grande o pequeña. Al mismo tiempo se plantea si hacer un estudio de Mercado. Este tiene un costo de 800 dólares y puede indicar un mercado creciente o decreciente, la probabilidad de que la información sea favorable es de un 60%. Si el mercado es creciente, se espera tener unas ganancias de 95,000 dólares, si se hace un local grande, pero si por el contrario se hace un local pequeño, las ganancias pueden ser de \$25,000. Si el mercado es decreciente y se construye un local grande, se pueden perder \$10,200 dólares o \$7,500 si se construye un local pequeño.

Si no se realiza un estudio de mercado, la probabilidad de que el mercado será decreciente es de 60%, por lo contrario, un informe favorable incrementaría la probabilidad de que el mercado sea creciente en un 75%; y un informe desfavorable disminuye la probabilidad de un mercado creciente el 45%.

¿Qué decisión debe tomar la empresa?

El ejemplo anterior se resume en el siguiente cuadro de Excel.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Costo Estudio	800							
2									
3			Alternativas		Probabilidad	Ganancia/ perdida	Beneficio	Beneficio * probabilidad	
4	Sin Investigación de mercados	Grande	Mercado creciente		55%	\$ 95.000	\$ 95.000	\$ 52.250	\$ 6.350
5			Mercado Decreciente		45%	-\$ 102.000	-\$ 102.000	-\$ 45.900	
6		Pequeña	Mercado creciente		55%	\$ 25.000	\$ 25.000	\$ 13.750	\$ 10.375
7			Mercado Decreciente		45%	-\$ 7.500	-\$ 7.500	-\$ 3.375	
8	Con investigación de Mercado	Información favorable	Grande	Mercado creciente	75%	\$ 95.000	\$ 94.200	\$ 70.650	\$ 44.950
9				Mercado Decreciente	25%	-\$ 102.000	-\$ 102.800	-\$ 25.700	
10			Pequeña	Mercado creciente	75%	\$ 25.000	\$ 24.200	\$ 18.150	\$ 16.075
11				Mercado Decreciente	25%	-\$ 7.500	-\$ 8.300	-\$ 2.075	
12		Información Desfavorable	Grande	Mercado creciente	45%	\$ 95.000	\$ 94.200	\$ 42.390	-\$ 14.150
13				Mercado Decreciente	55%	-\$ 102.000	-\$ 102.800	-\$ 56.540	
14			Pequeña	Mercado creciente	45%	\$ 25.000	\$ 24.200	\$ 10.890	\$ 6.325
15				Mercado Decreciente	55%	-\$ 7.500	-\$ 8.300	-\$ 4.565	

Tabla 3.Resumen Ejemplo 4.

Fuente: Elaboración propia, 2018

A continuación, se presentarán algunas capturas de pantallas con la forma de cómo crear el árbol de decisión en el complemento Pesicion Treee para el caso descrito anteriormente.

1. En la pestaña del complemento Pesicion Tree, se da clic en “Árbol de decisión” y se elije la celda en la que se desea iniciar el árbol.

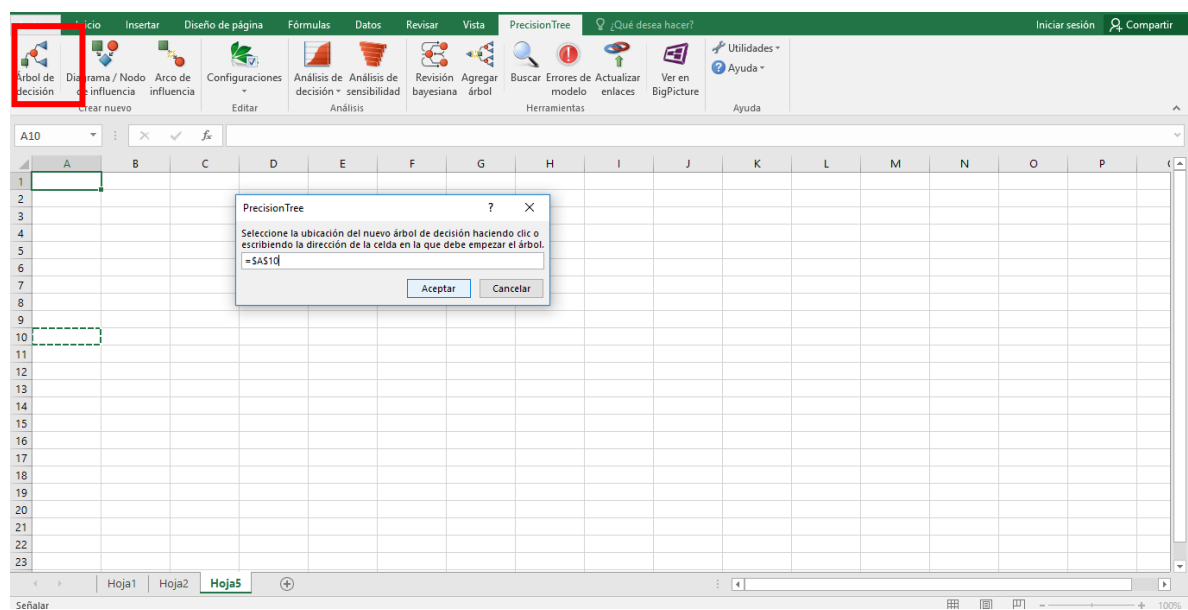


Ilustración 12.Crear un árbol de decisión. Ejemplo 4.

Fuente: Elaboración Propia, 2018

2. Posteriormente asignamos un nombre al árbol de decisión y damos “aceptar”.

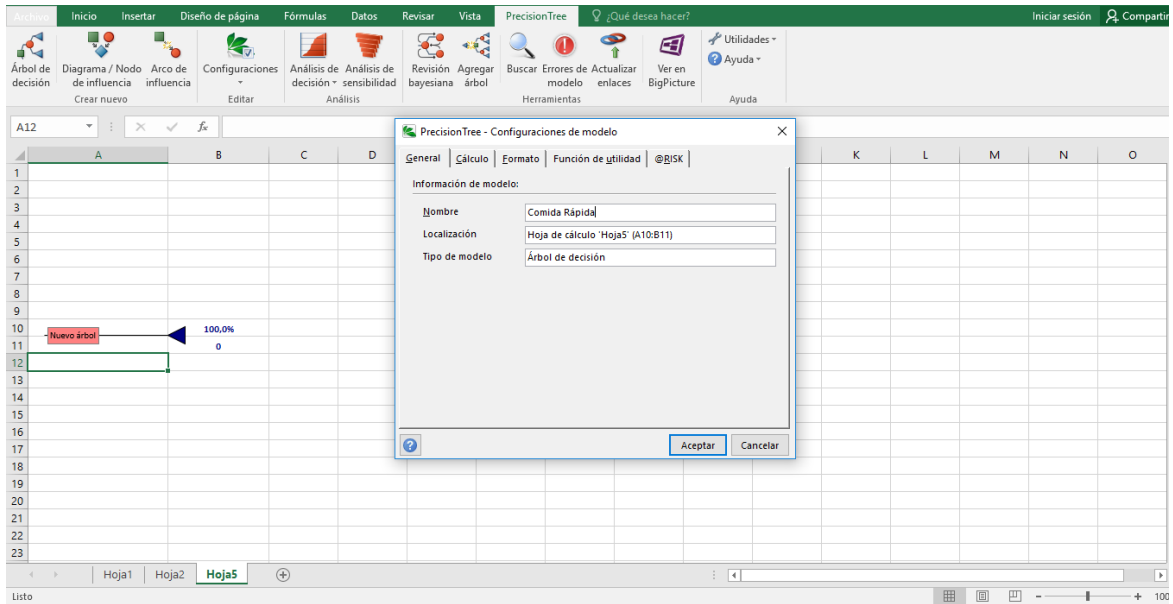


Ilustración 13. Nombrar un árbol de decisión. Ejemplo 4.

Fuente: Elaboración Propia, 2018

3. Se elige el primer nodo de decisión, dando clic en el triángulo azul, y cuando se despliega se elige el tipo de nodo, para este ejemplo es un nodo de decisión. En la ventana emergente se asignan los nombres a las ramas, para el ejemplo una se llamará “Con estudio de Mercado” y “Sin estudio de Mercado”.

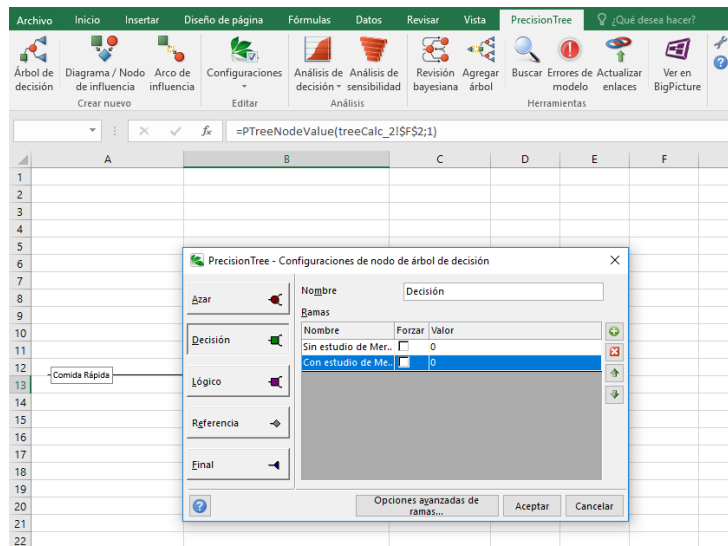


Ilustración 14. Crear un nodo de decisión o azar. Ejemplo 4.

Fuente: Elaboración Propia, 2018

Quedando así nuestra primera ramificación, por ahora no se tiene una decisión o un porcentaje (%) asociado a la rama:

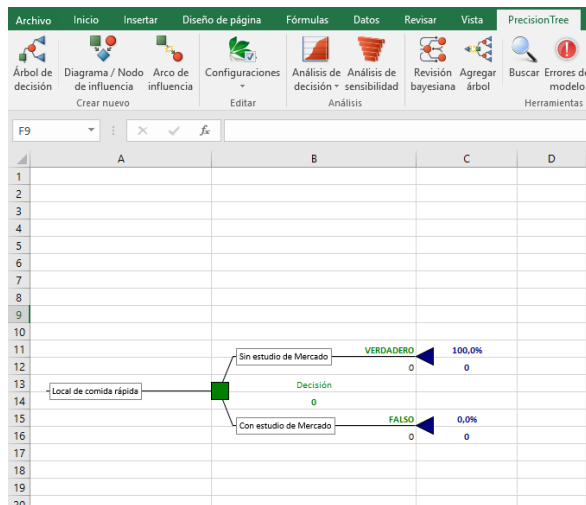


Ilustración 15. Resultado de primera decisión. Ejemplo 4.

Fuente: Elaboración Propia, 2018

4. Luego para la rama “Sin estudio de Mercado” creamos otro Nodo de decisión, creando las dos ramas de construcción grande y pequeña, esto lo hacemos dando clic en el triángulo azul de la rama “Sin estudio de Mercado” y seleccionado de nuevo un nodo de decisión.

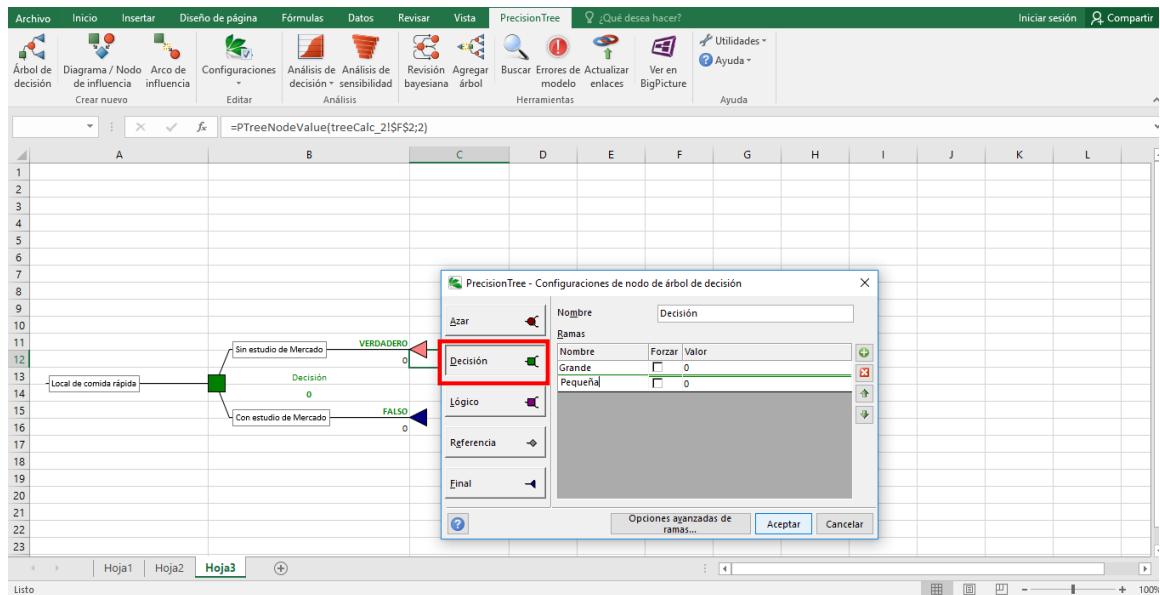


Ilustración 16. Segundo nodo de decisión. Ejemplo 4.

Fuente: Elaboración Propia, 2018

Lo que deja como el resultado:

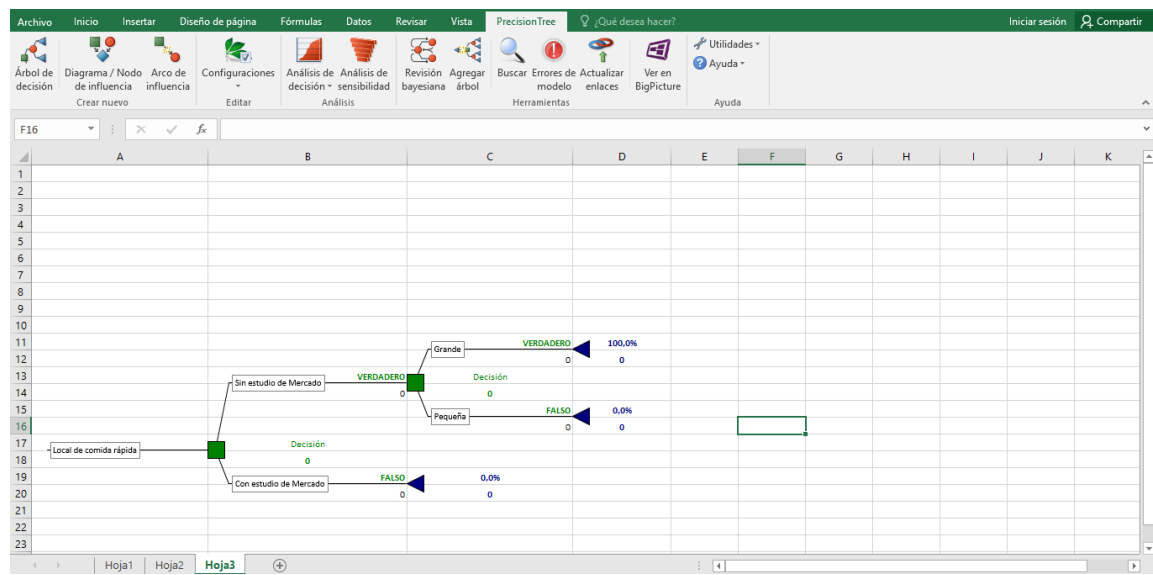


Ilustración 17. Resultado segundo nodo de decisión. Ejemplo 4

Fuente: Elaboración Propia, 2018

5. Para la rama de construcción grande, dando clic en el triángulo azul, asignamos un nodo de probabilidad o azar (el círculo) para este caso, ponemos la probabilidad de un mercado creciente y decreciente en cada una de las ramas, a las que se le asigna un porcentaje, en la columna probabilidad, de 55% y 45% respectivamente, igualmente se le asigna un beneficio en la columna Valor de la siguiente forma (se asignan los valores de la colina E y G de la Tabla 3 :resumen de Ejemplo 3, que corresponden al caso que se está elaborando) :

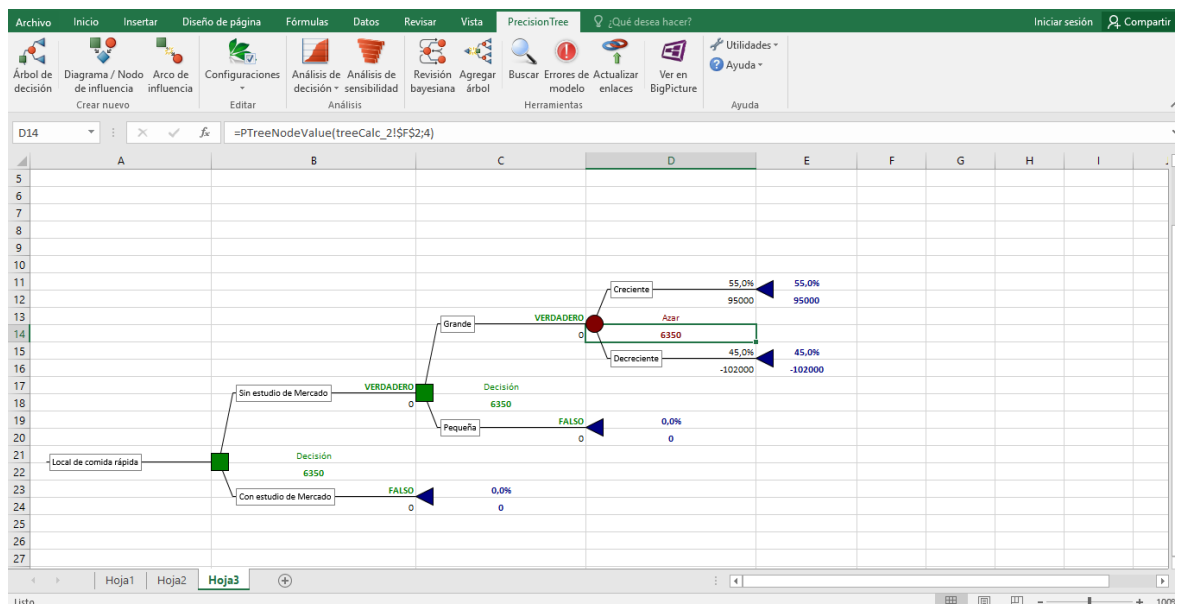


Ilustración 19. Resultado primer nodo de probabilidad. Ejemplo 4.

Fuente: Elaboración Propia, 2018

Como se aprecia en la imagen anterior, ya se asignan porcentajes de probabilidad para el nodo y los valores de la decisión. A medida que construimos la parte restante del ejercicio, se puede observar cómo los valores van cambiando.

6. Realizamos el mismo procedimiento para la rama “Pequeña” asignando los porcentajes de 55% a “creciente” y 45% a “decreciente” y los valores de \$25.000 y -\$7.500.

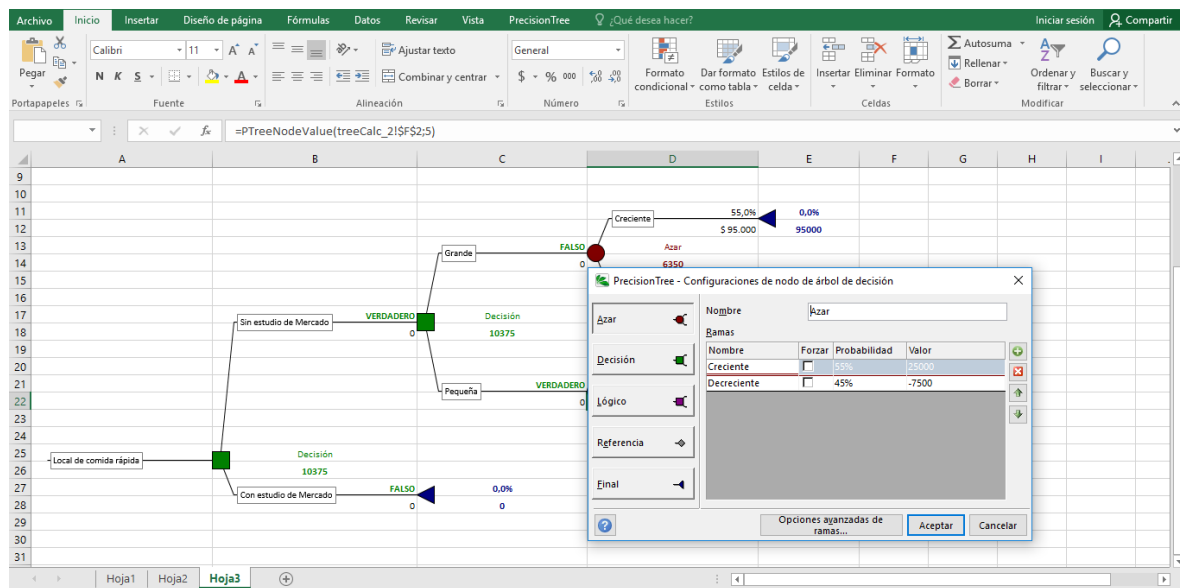


Ilustración 20. Segundo nodo de probabilidad. Ejemplo 4.

Fuente: Elaboración Propia, 2018

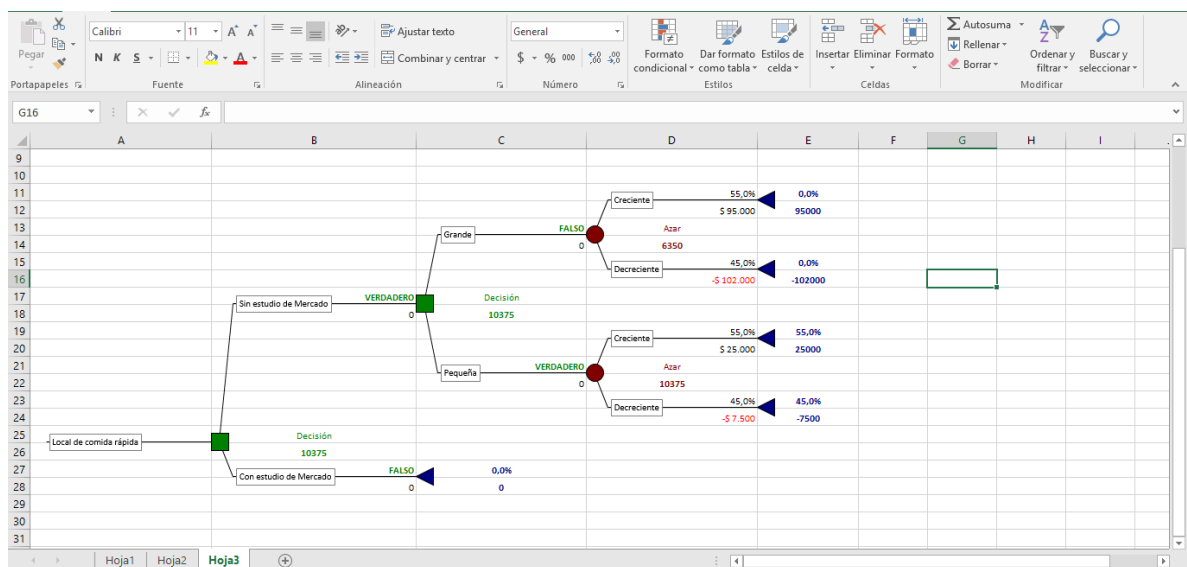


Ilustración 21. Resultado segundo nodo de probabilidad.

Fuente: Ejemplo 4. Elaboración Propia, 2018

El software nos va indicando el camino o la decisión que debemos tomar, si no tuviéramos la opción de hacer un estudio de mercado, la mejor decisión sería hacer una construcción pequeña.

7. Para el nodo de “Con estudio de Mercado” se hace clic en el triángulo azul de la rama y seleccionamos en nodo de azar, asignando dos ramas “Información Favorable” e “Información Desfavorable” dando un porcentaje de 60% y 40%.

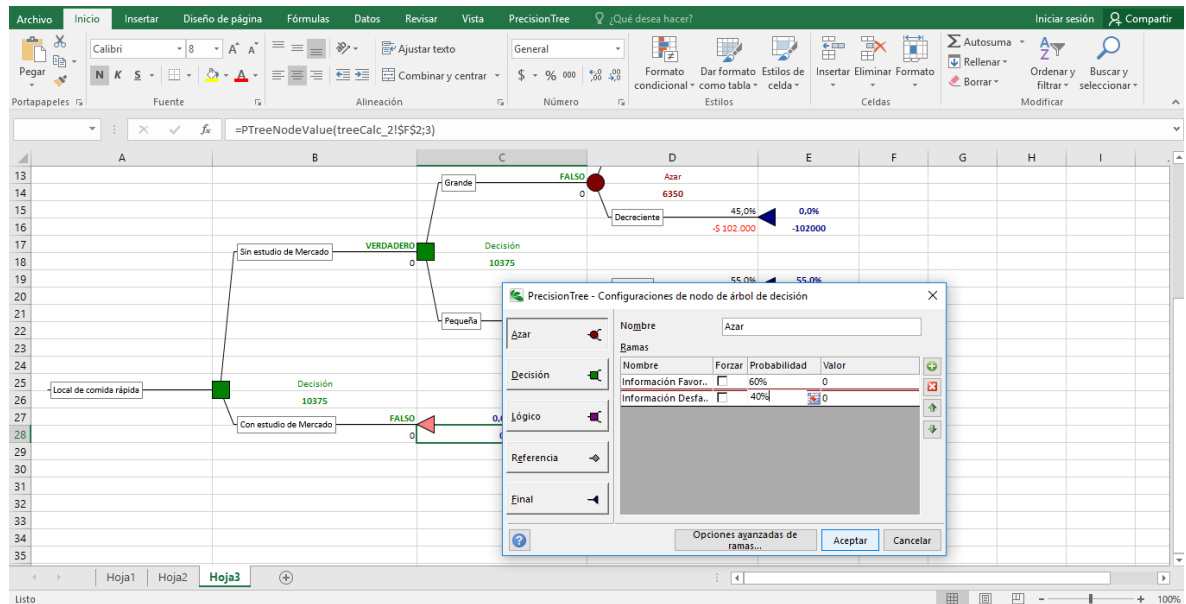


Ilustración 22. Tercer nodo de probabilidad. Ejemplo 4.

Fuente: Elaboración Propia, 2018

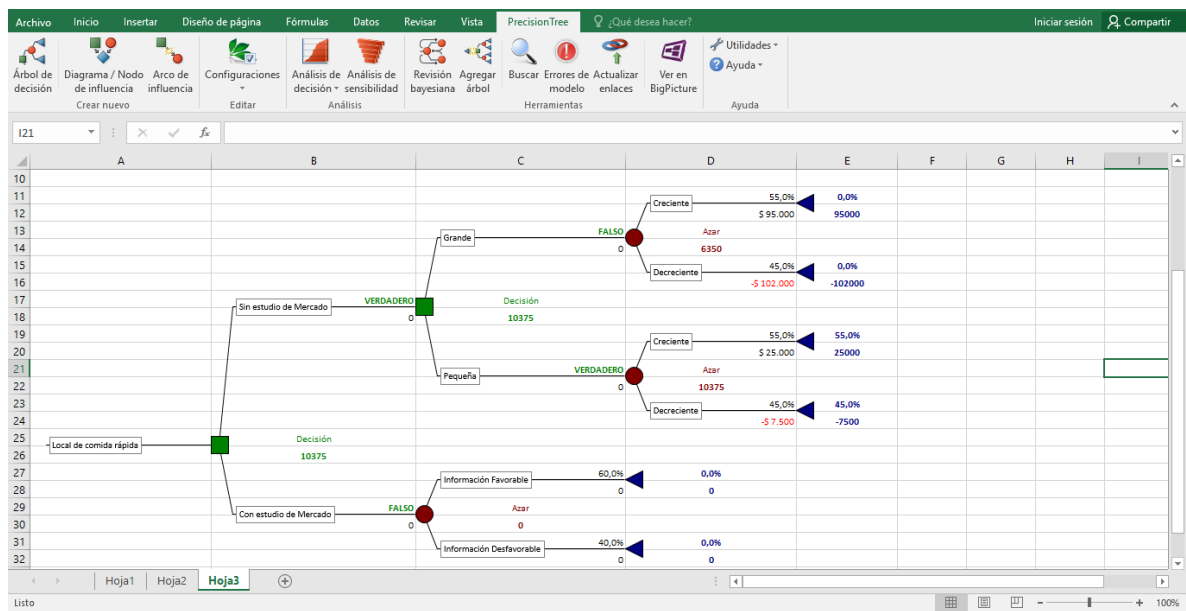


Ilustración 23. Resultado tercer nodo de probabilidad. Ejemplo 4.

Fuente: Elaboración Propia, 2018

8. Para la rama “Información Favorable”, haciendo clic en el triángulo de la rama, se selecciona un nodo de decisión para la construcción grande o pequeña.

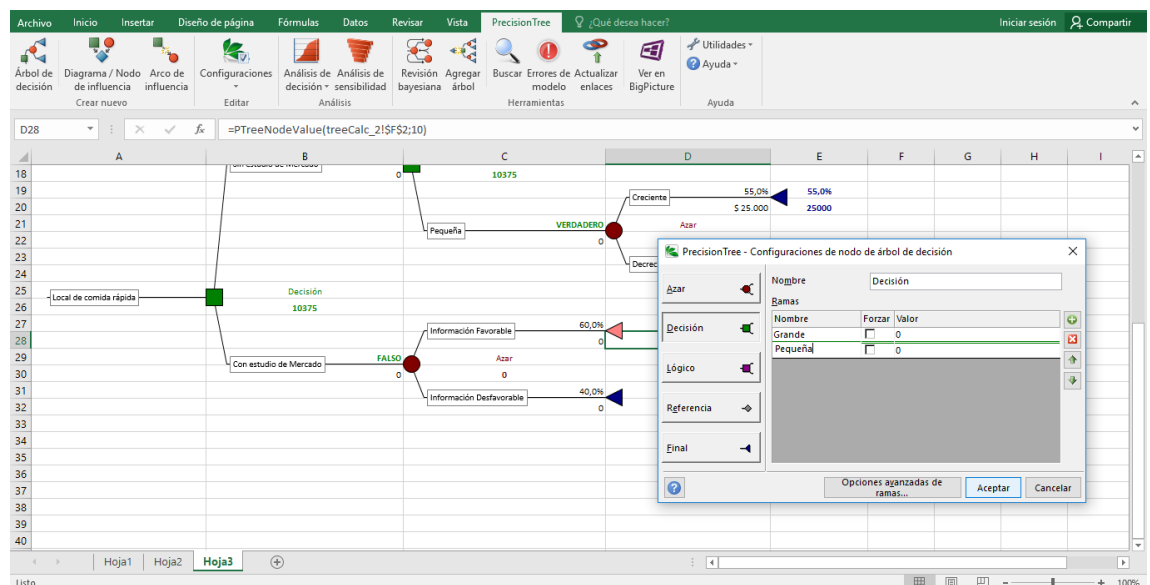


Ilustración 24. Tercer nodo de decisión. Ejemplo 4.

Fuente: Elaboración Propia, 2018

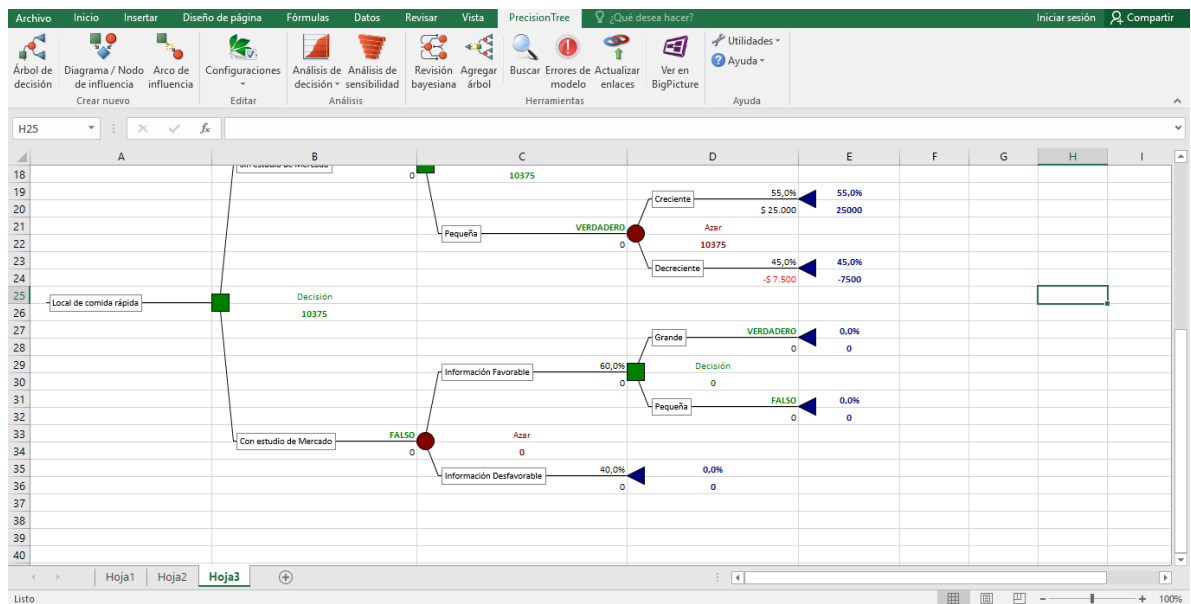


Ilustración 25. Resultado Tercer nodo de decisión. Ejemplo 4.

Fuente: Elaboración Propia, 2018

9. Al igual que las ramas de Grande y Pequeña de los pasos 5 y 6. Con un 75% de probabilidad para creciente y 25% para decreciente. Los valores son los que se muestran en la tabla 3, para esos valores hay que tener en cuenta que el estudio tiene un costo de \$800 dólares, de la siguiente forma:

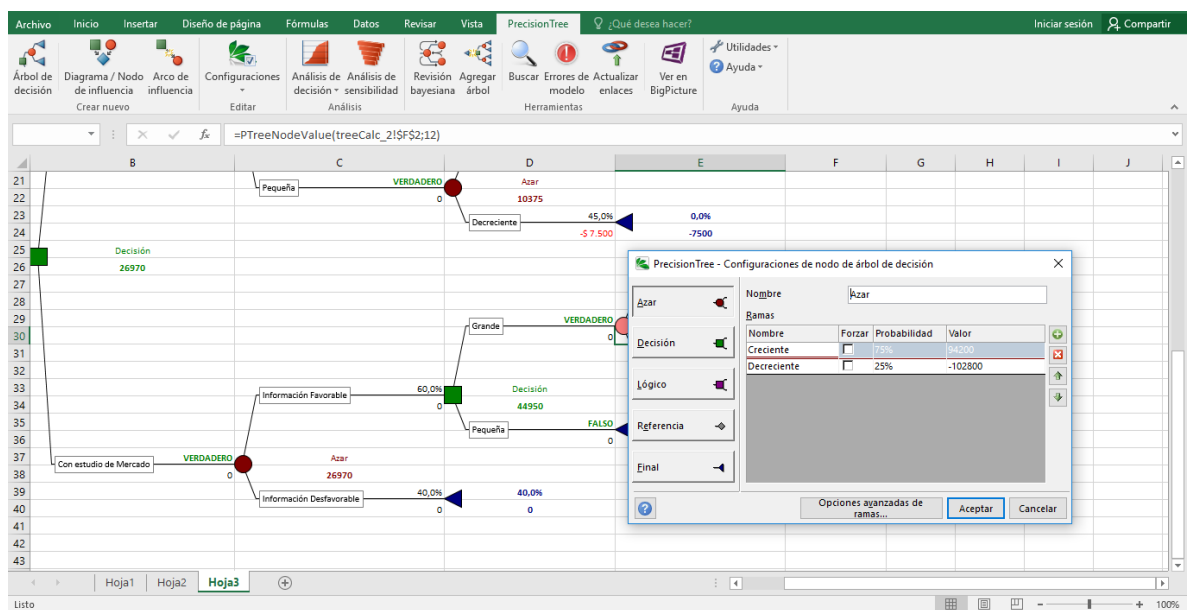


Ilustración 26. Cuarto nodo de decisión construcción grande. Ejemplo 4. Fuente: Elaboración Propia, 2018

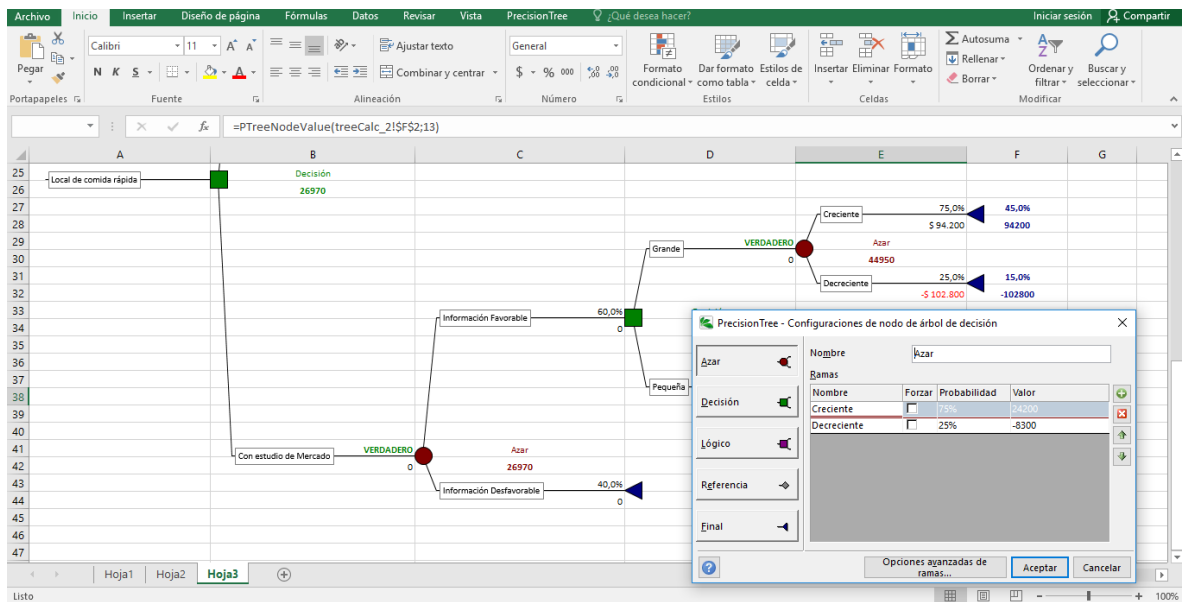


Ilustración 27.Cuarto nodo de decisión construcción pequeña. Ejemplo 4.

Fuente: Elaboración Propia, 2018

Dejando como resultado:

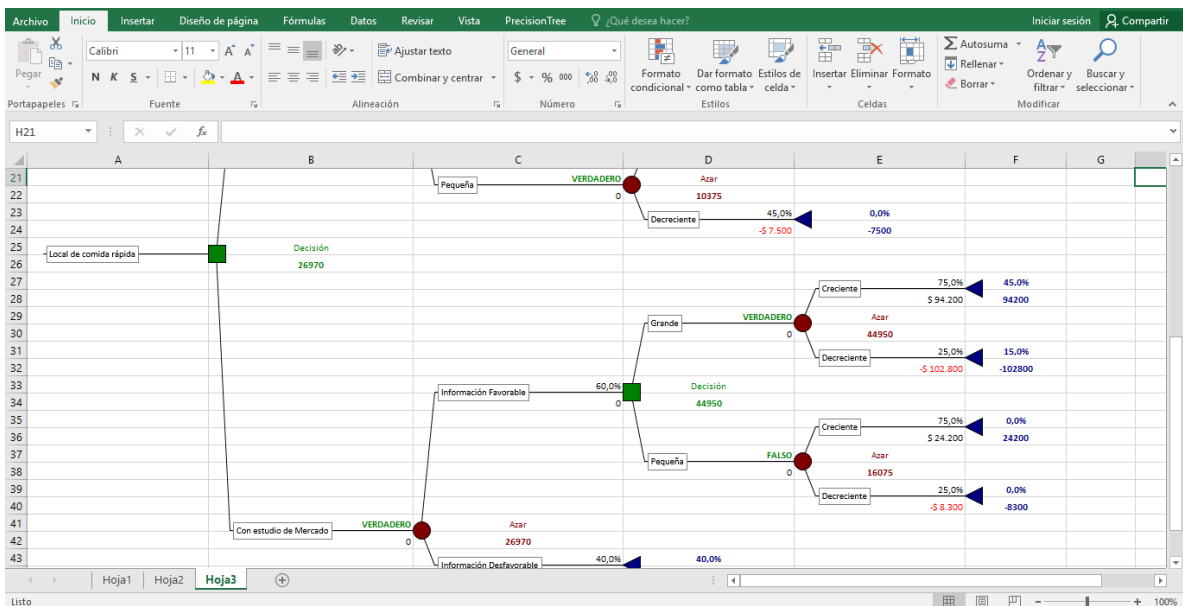


Ilustración 28.Resultado Nodo “Sin estudio de mercado”. Ejemplo 4.

Fuente: Elaboración Propia, 2018

10. Para la rama de información desfavorable se asigna también un nodo de decisión de “Grande” y “Pequeña”

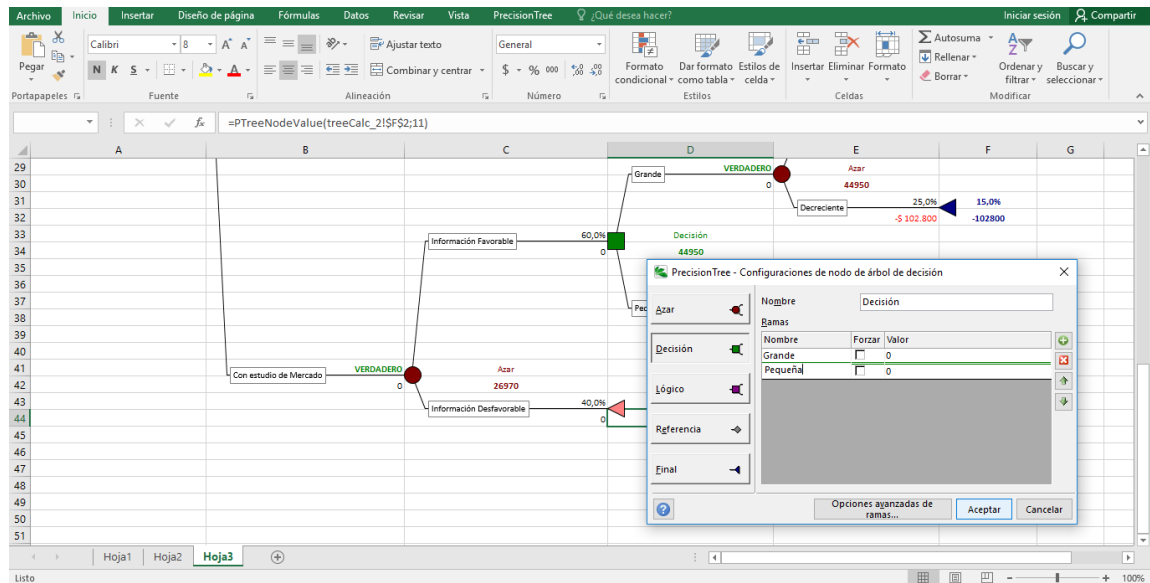


Ilustración 29. Nodo de decisión “información desfavorable”. Ejemplo 4.

Fuente: Elaboración Propia, 2018

11. Al igual que en el paso 9, se crean los nodos de azar para el mercado creciente y decreciente de las ramas “Grande” y “Pequeña”, teniendo en cuenta que si la información es desfavorable, los % y ganancias cambian y también se debe tener en cuenta que se deben pagar los \$800 dólares del estudio de Mercado.

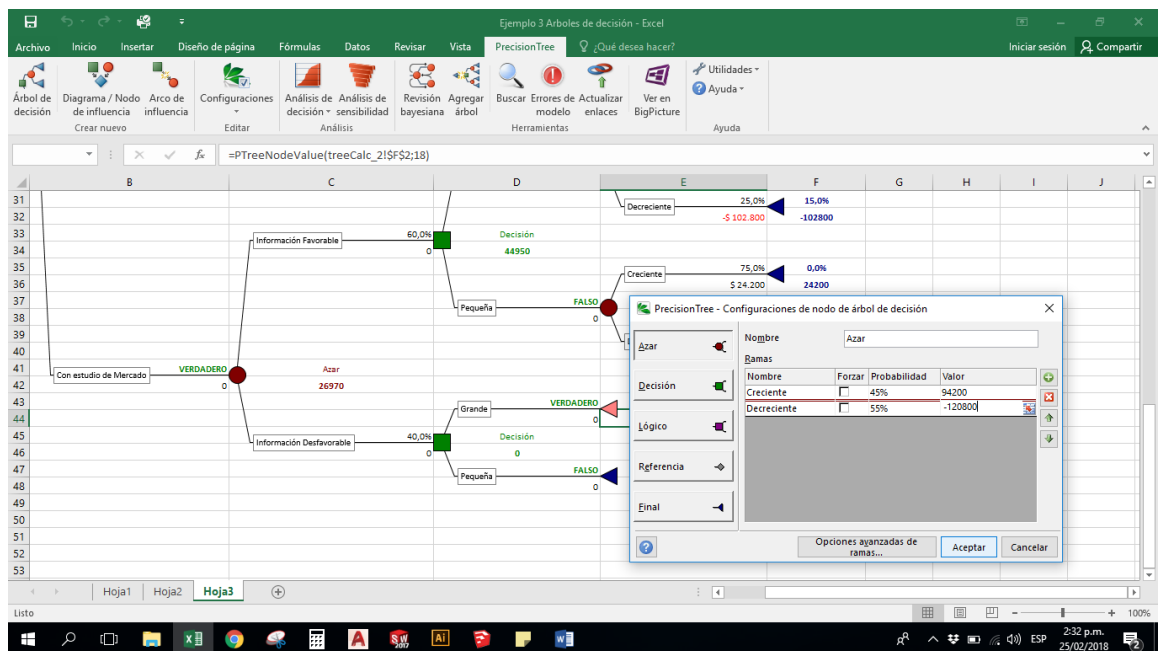


Ilustración 30.Nodo de decisión “información desfavorable” para construcción “grande”. Ejemplo 4.

Fuente: Elaboración Propia, 2018

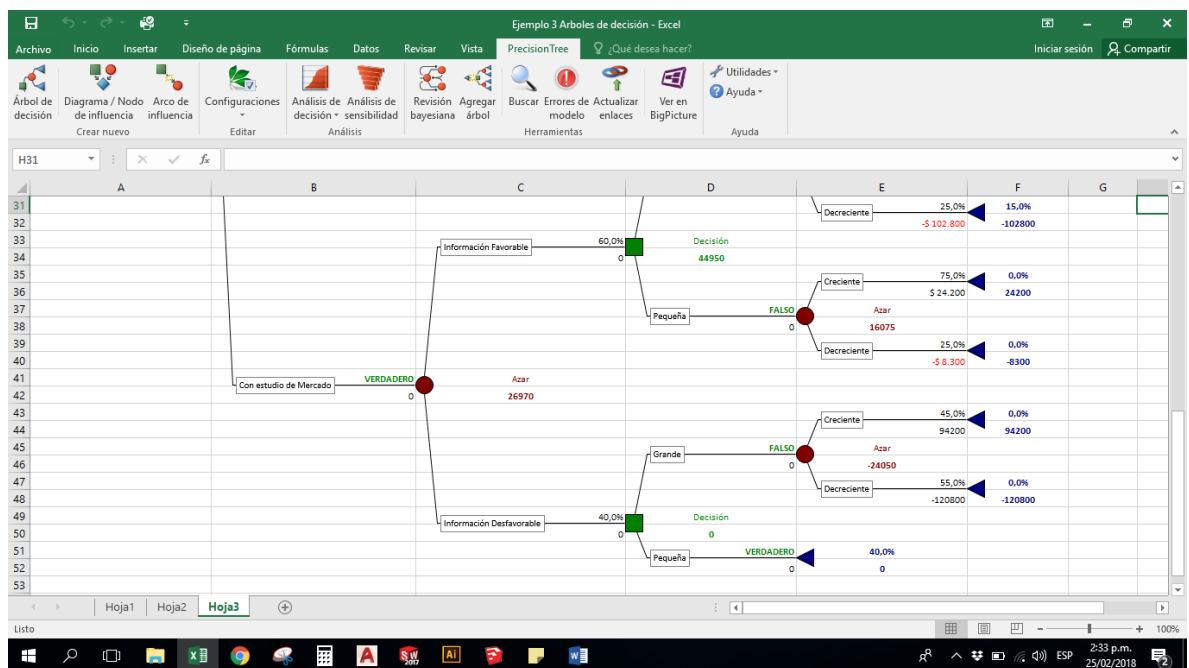


Ilustración 31.Resultado nodo de decisión “información desfavorable” para construcción “grande”. Ejemplo 4.

Fuente: Elaboración Propia, 2018

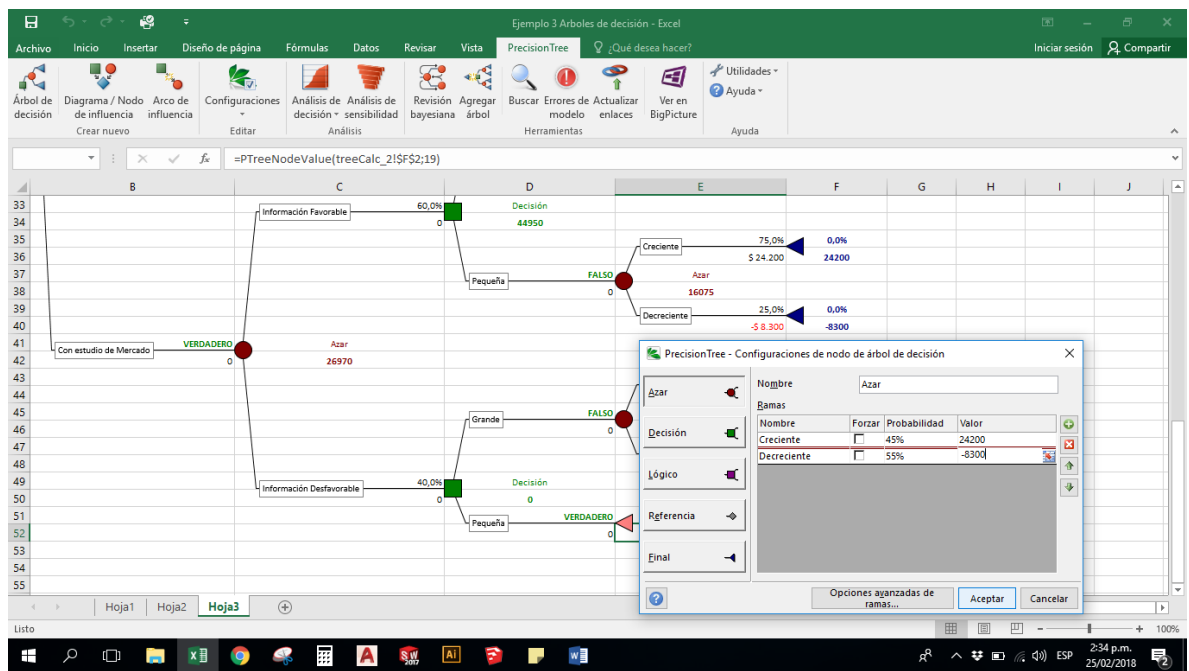


Ilustración 32. Nodo de decisión “información desfavorable” para construcción “Pequeña”. Ejemplo 4.

Fuente: Elaboración Propia, 2018

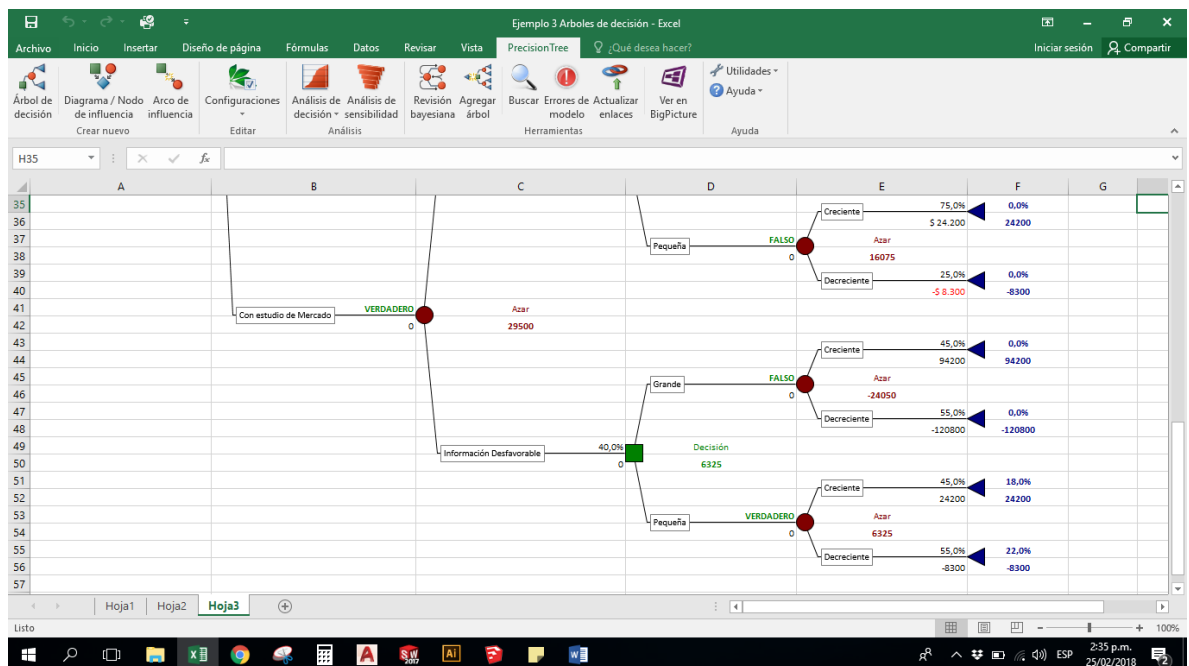


Ilustración 33. Resultado nodo de decisión “información desfavorable” para construcción “Pequeña”. Ejemplo 4.

Fuente: Elaboración Propia, 2018

A continuación, la forma total del árbol de decisión completo:

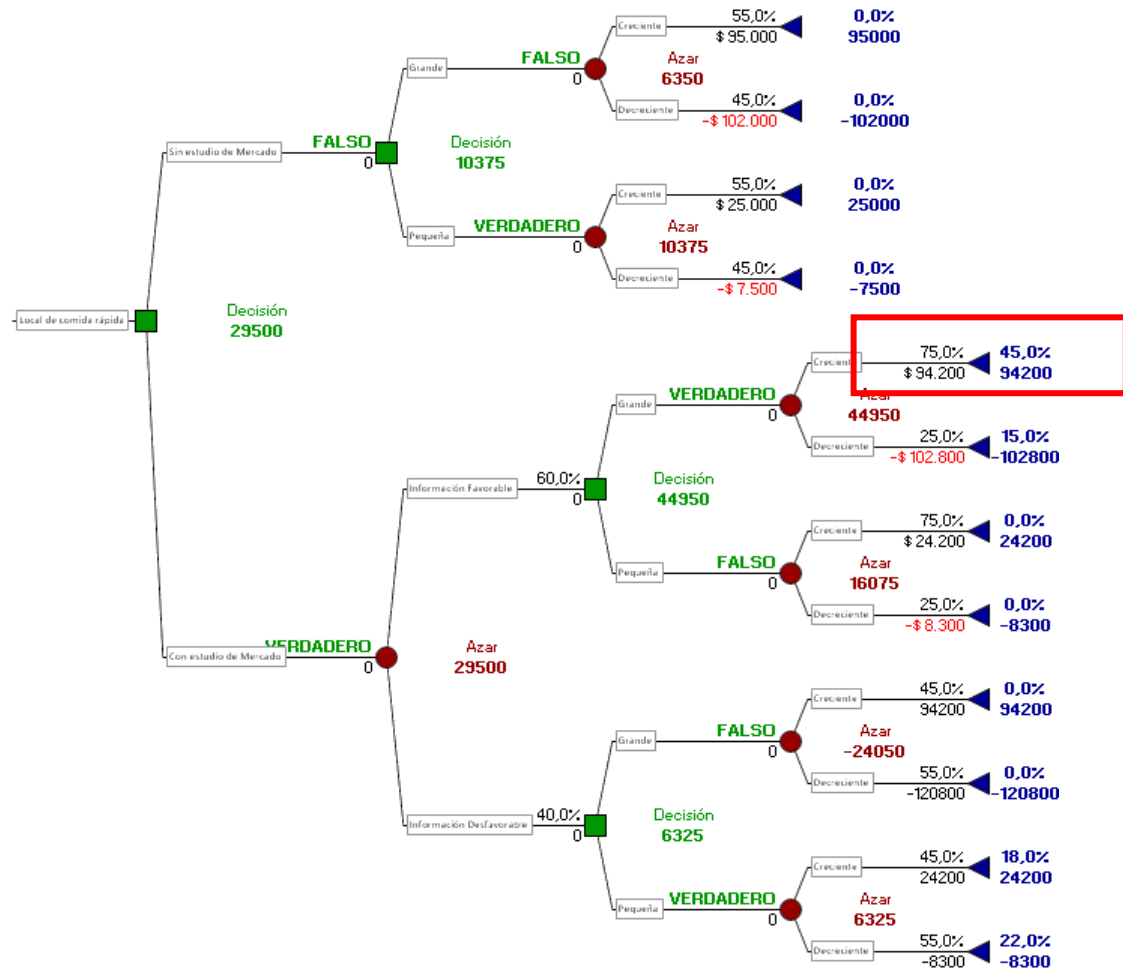


Ilustración 34.Árbol de decisión Ejemplo 4.

Fuente: Elaboración Propia, 2018

Los resultados de la derecha son el valor acumulativo y la probabilidad de cada rama, calculado automáticamente por Presicion Tree. Para el ejercicio que se desarrolló, la mejor opción es la de realizar el estudio, y hacer la construcción grande, ya que genera un beneficio de \$94.200 dólares, con una probabilidad de un 45% de que ocurra (resultado en el cuadro Rojo). Pero si el estudio es desfavorable, la decisión debería ser no realizar nada, dado que si se realiza una construcción pequeña hay una probabilidad de 22 % de que el mercado sea desfavorable y se pierdan \$8.300 dólares, si se realiza la construcción pequeña y el mercado es creciente, siendo la única que en esa rama genera beneficio (\$24.200 dólares, con

una probabilidad de 18%) la probabilidad de ganancia es mucho más pequeña que de pérdida.

El complemento de Excel, Precision Tree, permite hacer análisis de decisión, lo que ayuda a encontrar la ruta óptima a través del árbol y calcular los posibles resultados. A continuación se muestra cómo se realiza este análisis para el ejemplo que venimos trabajando. Se hace clic en el icono análisis de decisión y perfil de riesgo, se seleccionan todas las rutas y todos los informes.

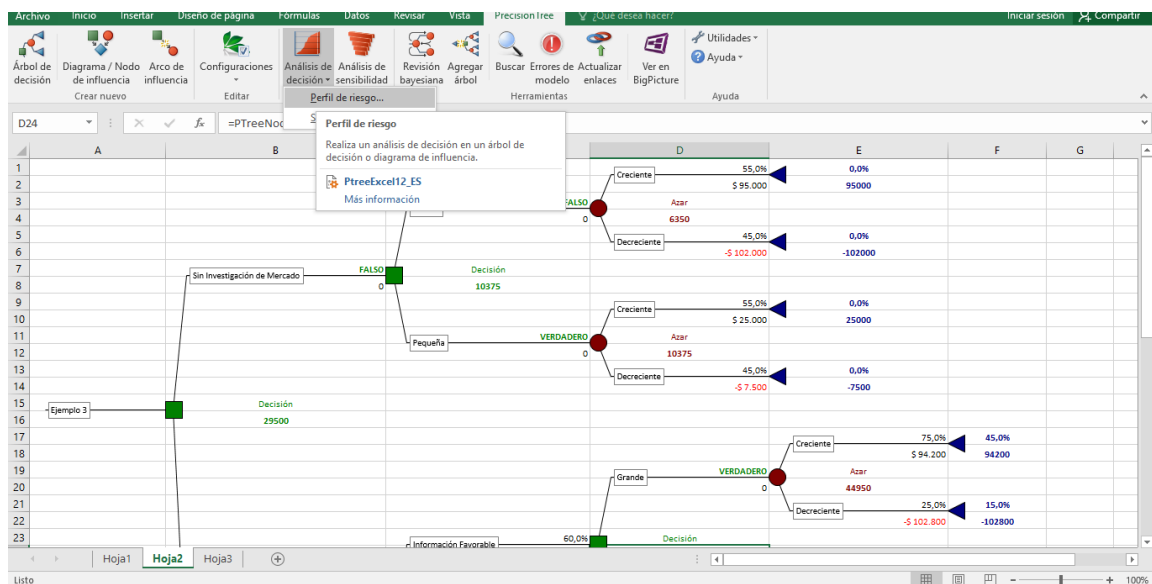


Ilustración 35. Análisis perfil de riesgos Ejemplo 4.

Fuente: Elaboración Propia, 2018

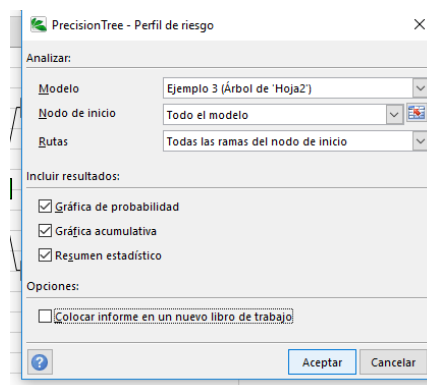


Ilustración 36. Características perfil de riesgos Ejemplo 3.

Fuente: Elaboración Propia, 2018

La “gráfica de probabilidad” muestra los resultados finales para cada opción, para este caso es de hacer estudio o no hacer estudio, la Grafica 1 muestra el beneficio en el eje X y la probabilidad en de que se obtenga esa ganancia, está en el eje Y. La opción en la que más beneficio se obtiene es “Con estudio” y tiene una probabilidad aproximadamente de 50%. Aunque la barra más grande (Barra Azul) tiene una probabilidad superior a 50%, pero no genera tanto beneficio.

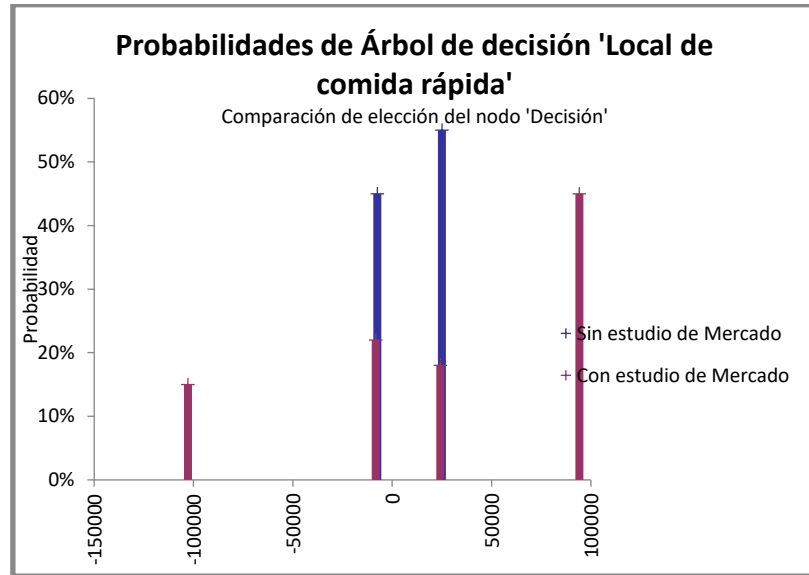


Gráfico 1: Gráfico de probabilidad Ejemplo "Comida Rápida"

Fuente: elaboración propia

La “Grafica acumulativa” muestra la probabilidad de un resultado final menor o igual a un cierto valor para cada una de las opciones.

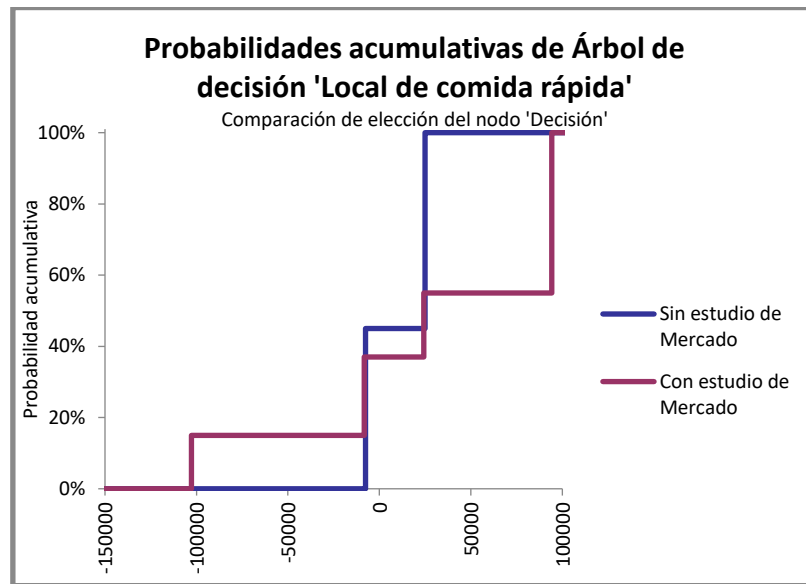


Gráfico 2: Gráfica acumulativa Ejemplo “Comida Rápida”

Fuente: elaboración propia

El resumen estadístico (Tabla 4), muestra la media, desviación estándar, la moda y demás datos estadísticos del modelo de decisión.

Estadística	Sin estudio de Mercado	Con estudio de Mercado
Media	10375	29500
Mínimo	-7500	-102800
Máximo	25000	94200
Modo	25000	94200
Desviación estándar	16168,54585	69488,38032
Índice de asimetría	-0,2010	-0,7075
Curtosis	1,0404	2,3285

Tabla 4. Resumen estadístico Ejemplo 4. Resultado Presicion Tree

Fuente: elaboración propia

Presicion Tree tiene la posibilidad de mostrar solo la ruta óptima a través del árbol y proporciona una tabla que muestra la opción óptima en cada nodo de decisión. Para eso se selecciona Análisis de riesgo, sugerencia política, esta opción muestra

una forma reducida del árbol de decisión, el cual es la rama óptima del árbol. Para el ejemplo es:

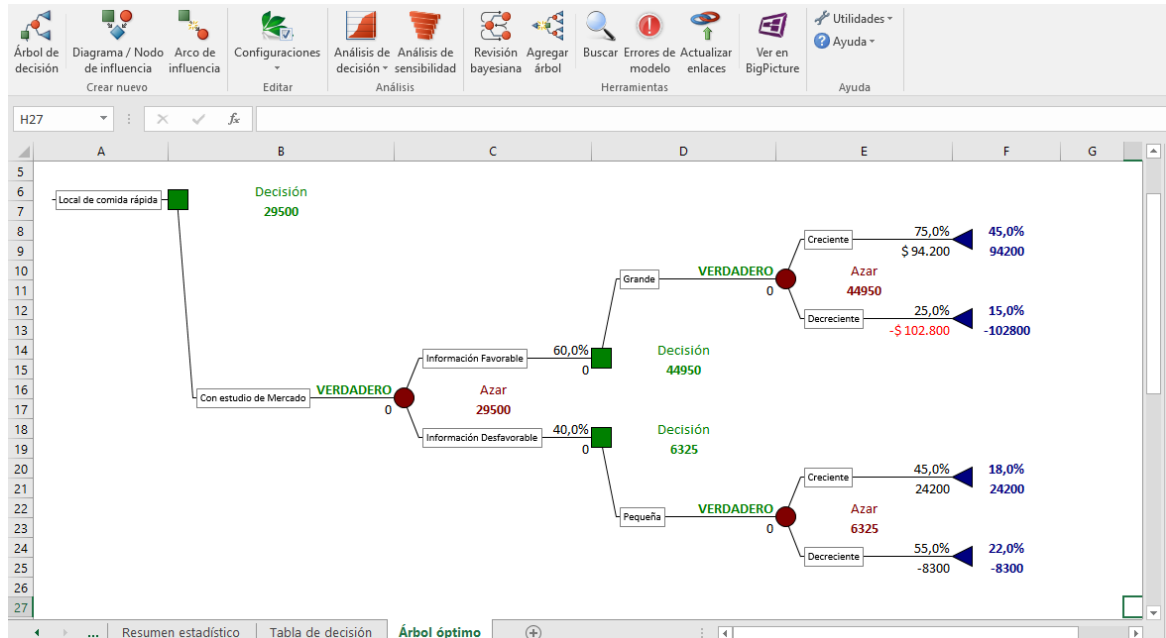


Ilustración 37.Árbol óptimo Ejemplo 4. Resultado Presicion Tree,

Fuente: elaboración propia, 2018.

El complemento, Presicion Tree, contiene unas técnicas avanzadas (como nodos de referencia, nodos lógicos, incluir una distribución a un nodo de azar, o diagramas de influencia), lo que logra que combinando los árboles con el análisis de sensibilidad y con @RISK, mejore el análisis a la hora de representar un rango continuo de resultados para eventos probabilísticos. Al ejecutar una simulación Montecarlo sobre un árbol de decisión, se pueden visualizar muchos más resultados posibles que si se realiza únicamente un árbol de decisión.

A continuación, se presenta el ejemplo de las técnicas avanzadas de Presicion Tree, como lo son los análisis de sensibilidad, análisis en una vía o dos vías y simulaciones con @Risk. Este ejemplo es tomado los tutoriales de la página de

Palisade, donde se descarga el complemento Precision Tree para Excel y donde se pueden consultar más ejemplos. (Palisade Corporation, 2018).

Ejemplo 5 Petróleo

Imagine que tiene que decidir si va a perforar un pozo petrolífero en un campo determinado. Perforar el pozo es caro y no sabe con antelación cuánto petróleo va a encontrar exactamente. Por lo tanto, el proyecto es bastante arriesgado. Sin embargo, puede hacer un estudio geológico inicial que le ofrezca una indicación que si se puede encontrar una gran cantidad de petróleo. Desafortunadamente, esta prueba es bastante cara. El costo de la prueba es \$10.000 dólares y el costo de perforar es \$70.000 dólares.

Si se realiza la prueba, se pueden generar tres resultados diferentes “Sin estructura”, “Estructura abierta” y “Estructura cerrada” con probabilidades de 41%, 35% y 24% respectivamente. Si se perfora (con prueba) sin estructura, se tiene un 73% de probabilidad de que el pozo esté seco, una probabilidad de 22% de que el pozo tenga una cantidad normal de petróleo y una probabilidad de 5% de que el pozo tenga mucho petróleo.

Si se perfora (con prueba) con estructura abierta, se tiene un 43% de probabilidad de que el pozo esté seco, una probabilidad de 34% de que el pozo tenga una cantidad normal de petróleo y una probabilidad de 23% de que el pozo tenga mucho petróleo.

Si se perfora (con prueba) con estructura cerrada, se tiene un 21% de probabilidad de que el pozo esté seco, una probabilidad de 37% de que el pozo tenga una cantidad normal de petróleo y una probabilidad de 42% de que el pozo tenga mucho petróleo.

Si se perfora, sin prueba, se tiene un 50% de probabilidad de que el pozo esté seco, una probabilidad de 30% de que el pozo tenga una cantidad normal de petróleo y una probabilidad de 20% de que el pozo tenga mucho petróleo.

En todos los casos, si el pozo está seco, no se obtienen ganancias; si el pozo tiene una cantidad normal de petróleo, se puede tener una ganancia de \$120.000 dólares, si se obtiene mucho petróleo con la perforación se obtiene una ganancia de \$270.000 dólares.

El árbol de decisión para este ejemplo se verá de la siguiente forma.

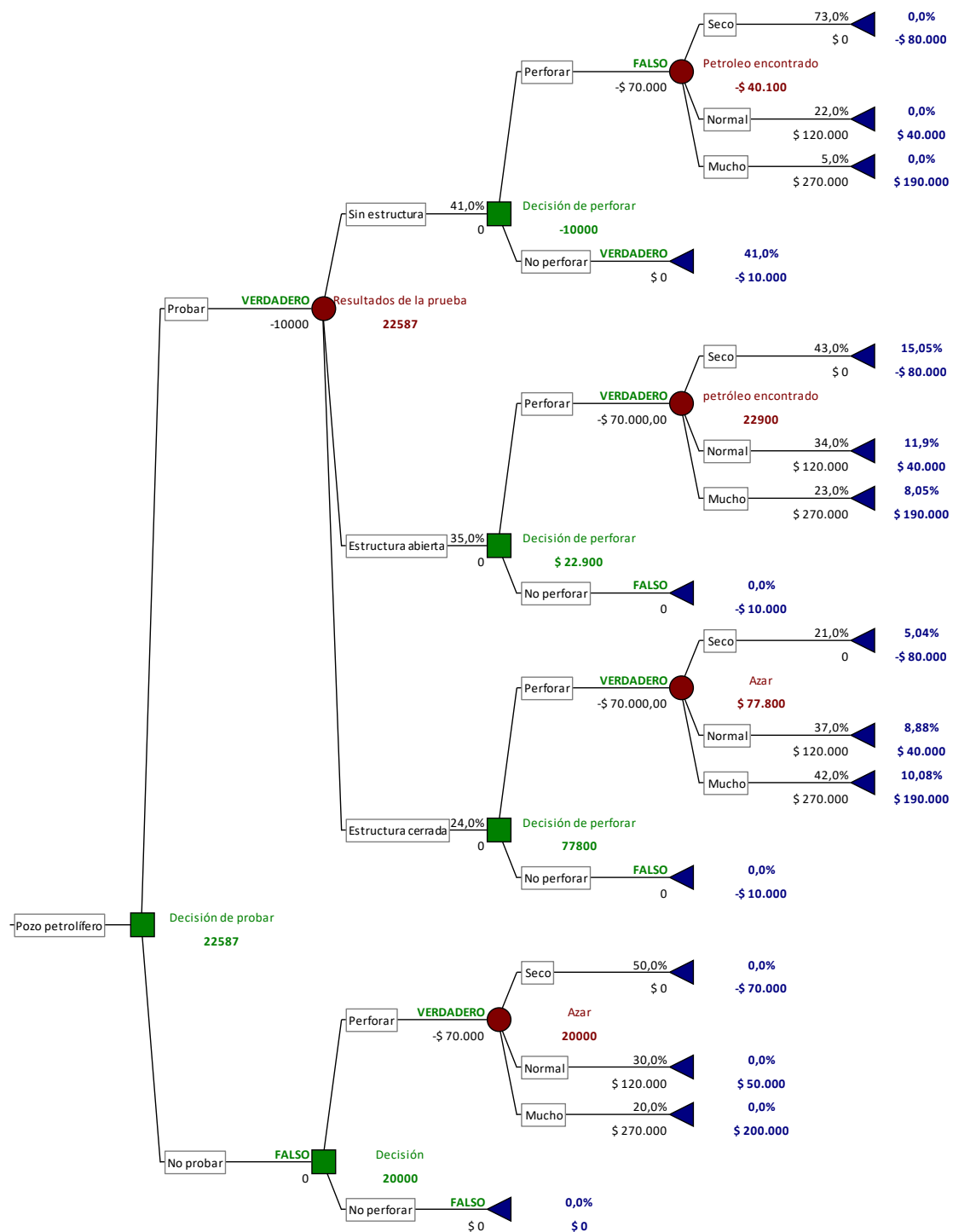


Ilustración 38.Árbol de decisión Ejemplo 5.
Fuente: (Adaptado de Palisade Corporation, 2018).

Si seleccionamos la sugerencia política para este ejemplo, nos muestra el árbol óptimo que presentamos a continuación. Al ejecutar el análisis se elige la rama del árbol que corresponde a “Probar”, si la opción muestra Sin estructura, la “mejor” decisión es la de no perforar, ya que es la que menos pérdidas genera (-\$10.000 dólares).

Si la estructura es abierta se debe perforar, lo que puede generar una ganancia de \$22.900 dólares. Si la estructura es cerrada se debe perforar, lo que permite tener mayor ganancia, pero con menor probabilidad.

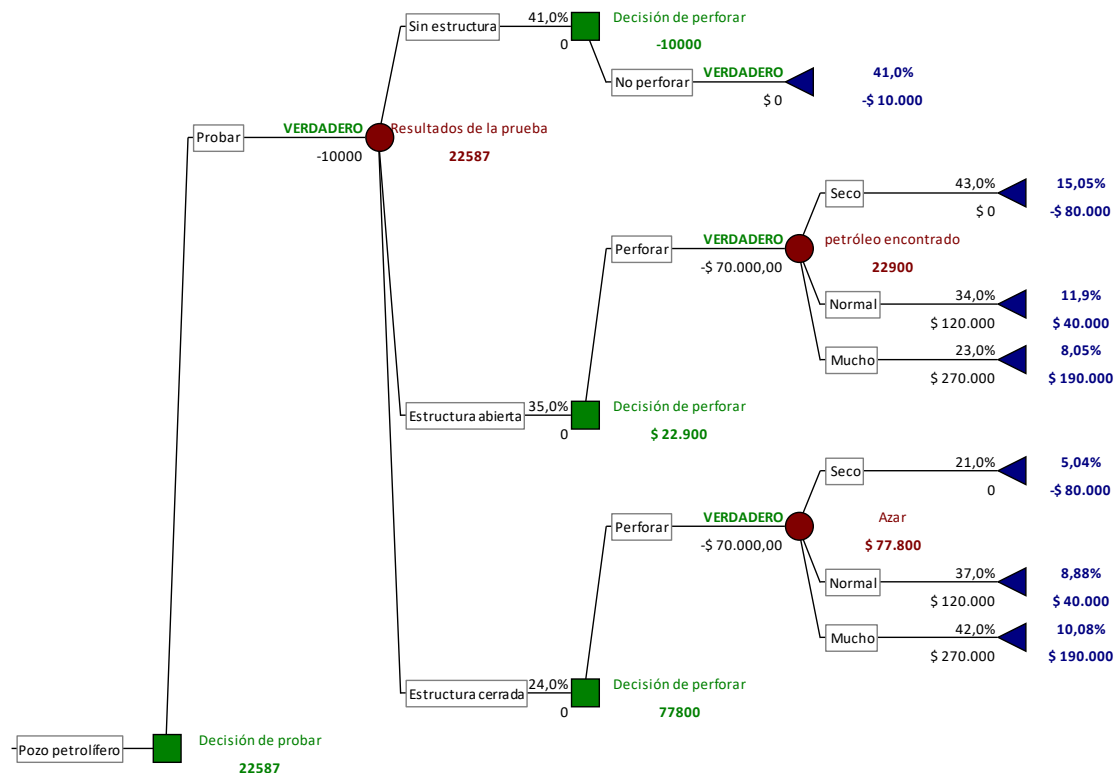


Ilustración 39.Árbol óptimo Ejemplo 5.

Fuente: (Adaptado de Palisade Corporation, 2018).

La herramienta contiene la posibilidad de hacer un análisis de sensibilidad al árbol, lo que nos permite examinar el efecto que causan las variaciones a una o más variables, lo que resulta útil para saber los valores “límites” máximo o mínimo que pueden hacer que se cambie la decisión óptima por otra opción. Un análisis de

sensibilidad no nos da una opción óptima, como se mostró anteriormente, pero ayuda a entender lo sensible que es el modelo al cambio de las variables. Primero se realizará un análisis de sensibilidad en una dirección para una variable de entrada.

1. Se da clic al ícono de análisis de sensibilidad, se elige hacer análisis en una dirección con el valor esperado del modelo, en el campo entradas se añaden los valores de entrada que se desean variar para este ejemplo, se cambiarán los valores del costo de la prueba, el costo de perforar con estructura abierta y el beneficio para el pozo Normal y Mucho. Para esto damos clic en añadir y se selecciona la celda que se desea variar.

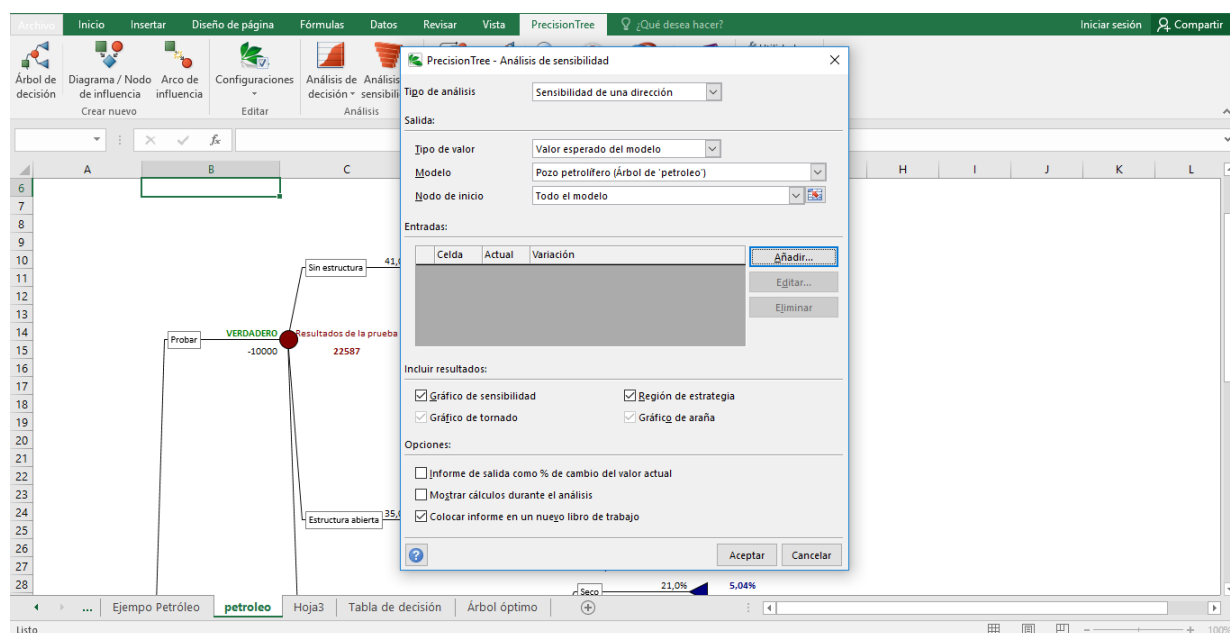


Ilustración 40. Análisis de decisión una dirección Ejemplo 5.

Fuente: (Adaptado de Palisade Corporation, 2018).

Primero se cambia el costo de perforar para una estructura abierta.

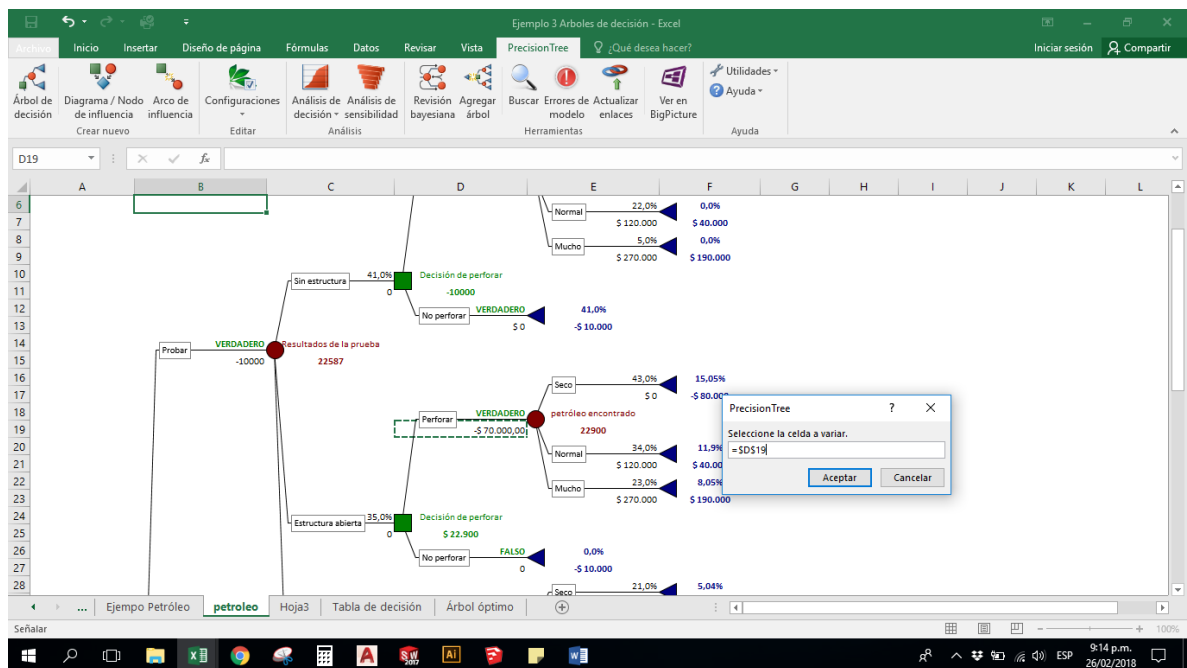


Ilustración 41. Elección entradas análisis de sensibilidad en una dirección Ejemplo 5.

Fuente: (Adaptado de Palisade Corporation, 2018)

2. Luego le indicamos a la herramienta que realice una variación, en el campo “Método” se puede elegir cómo realizar la variación, se puede hacer porcentualmente, cambio un más o menos al valor, o darle un mínimo y máximo real y fijo. Para el ejemplo se varían las variables en +/- 10% a excepción del costo de probar que se varían en +/- 50%.

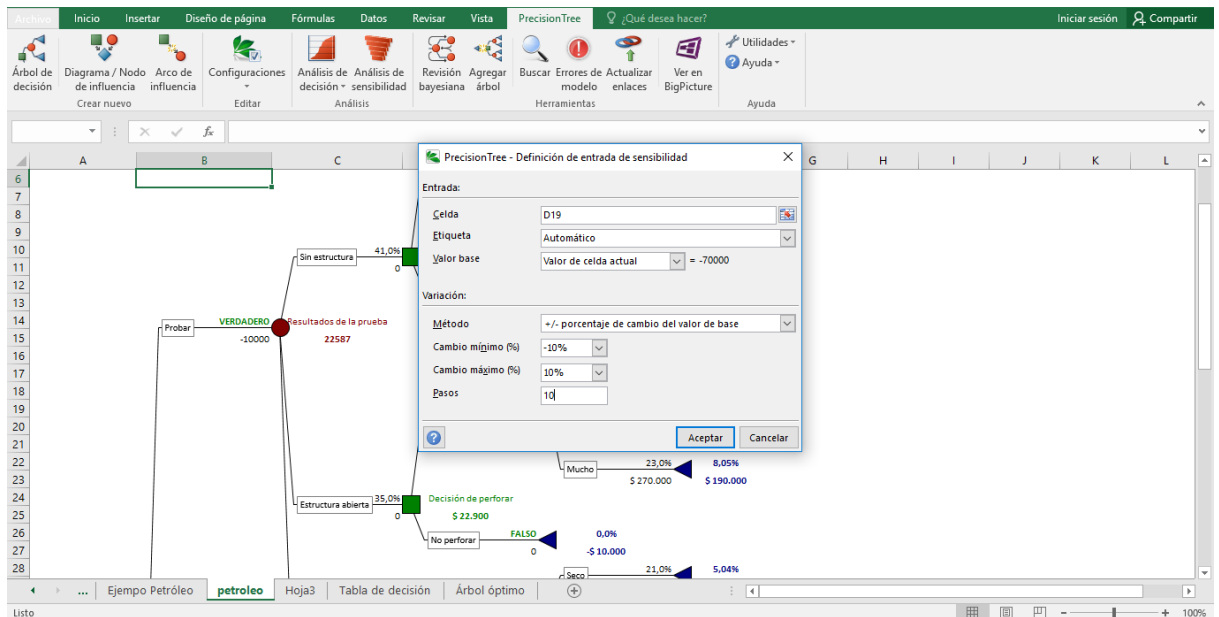


Ilustración 42. Variación entradas análisis de sensibilidad en una dirección Ejemplo 5.

Fuente: (Adaptado de Palisade Corporation, 2018).

Al modificar todas las variables se verá así:

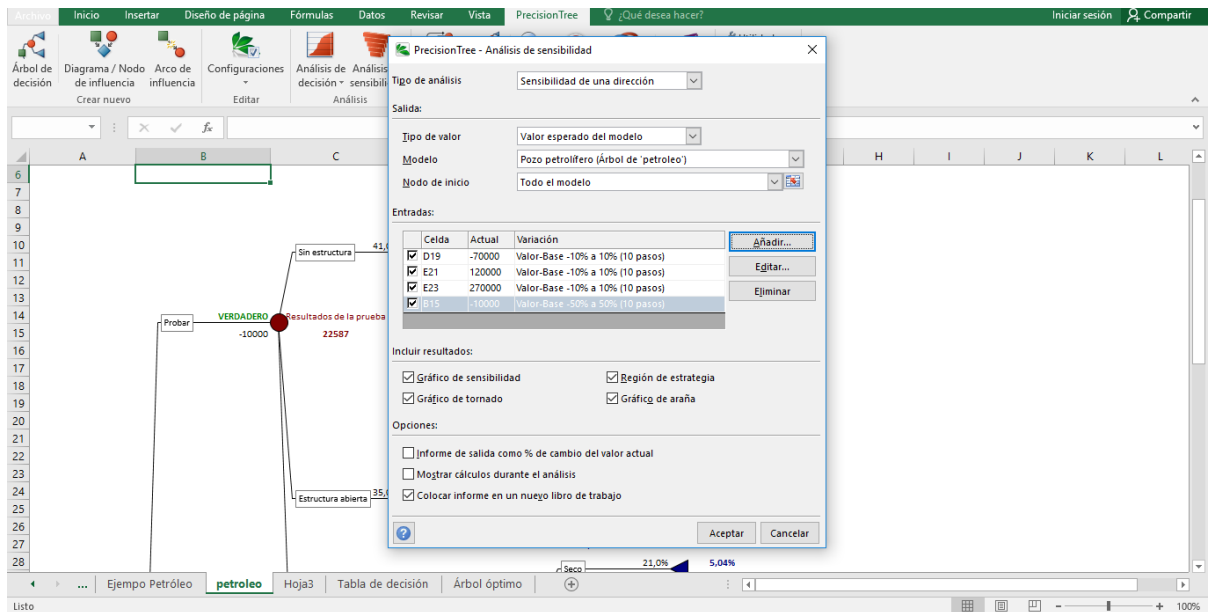


Ilustración 43. Elección entradas análisis de sensibilidad en una dirección Ejemplo 5.

Fuente: (Adaptado de Palisade Corporation, 2018).

Como resultado del análisis se puede elegir gráfico de sensibilidad, gráfico de tornado, región estrategia y gráfico de araña, para este ejemplo se sacarán todas las gráficas, a continuación, el resultado del análisis de sensibilidad.

Las **gráficas de sensibilidad** (una por cada variable modificada), muestra cómo se modifica cada una de las variables (en el eje X) y cómo varía el valor esperado (Eje Y) a medida que aumenta o disminuye el valor modificado. Por ejemplo, para la variable “Decisión de probar” se puede ver cómo el valor esperado no se ve afectado cuando el costo de la prueba es superior a \$13.000 dólares.

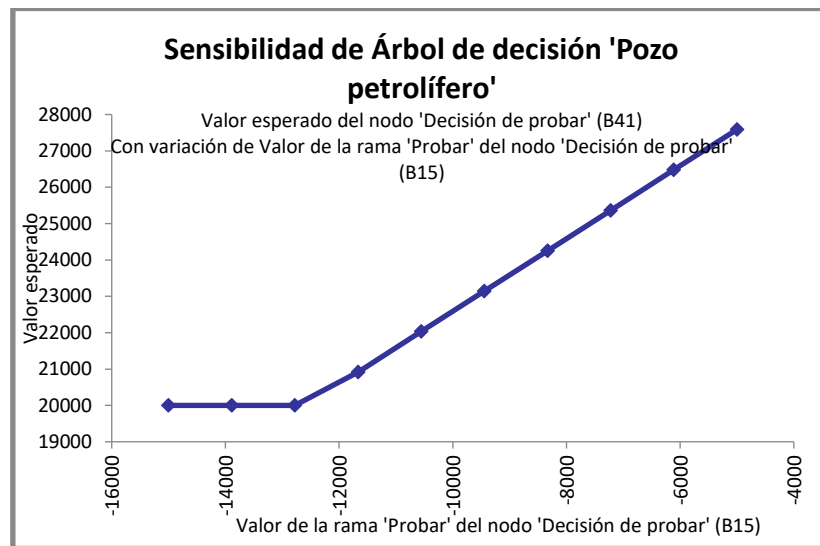


Gráfico 3: Gráfica de sensibilidad Ejemplo 5 “Petróleo

Fuente: (Adaptado de Palisade Corporation, 2018)

Las **gráficas de estrategia**, que también se crean una por cada variable modificada, muestran el valor que toma la variable (eje x) y cómo se comporta la decisión a tomar para cada valor inicial, es decir, para las ramas iniciales, en el ejemplo se muestra el comportamiento de probar o no probar, dependiendo de la variable modificada. El gráfico de estrategia para el ejemplo indica que si el costo de probar (Variable que se modificó) excede los \$13.000 dólares la decisión óptima es No probar.

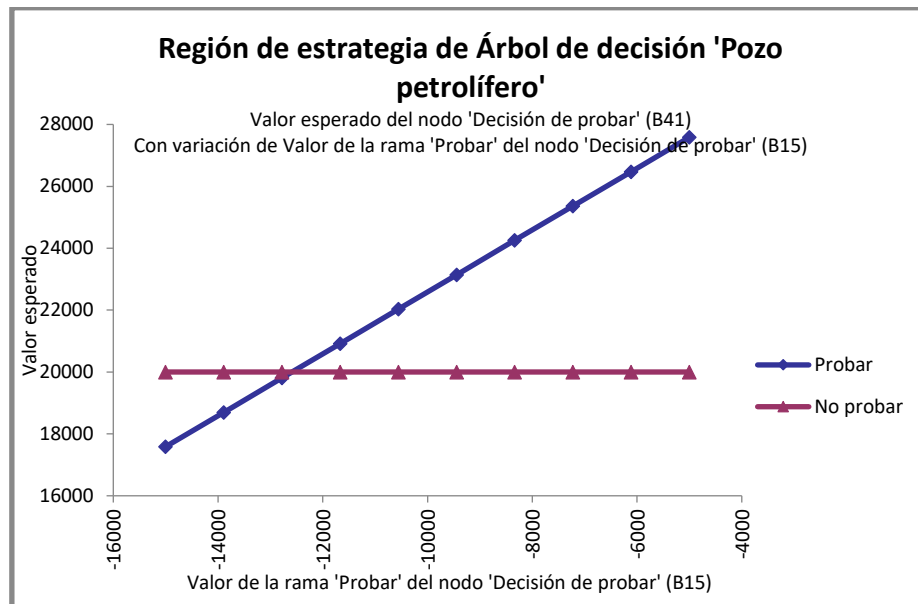


Gráfico 4: Gráfica de estrategia Ejemplo 5 “Petróleo”

Fuente: (Adaptado de Palisade Corporation, 2018).

La **gráfica de Tornado** muestra los cambios del valor esperado para cada variable modificada, la variable que tiene la barra grande indica que esa es la más sensible a un cambio. Para el ejemplo, el valor esperado del modelo es más sensible al modificar el Costo de probar. (Hiller, Hiller, & Lieberman, 2002).

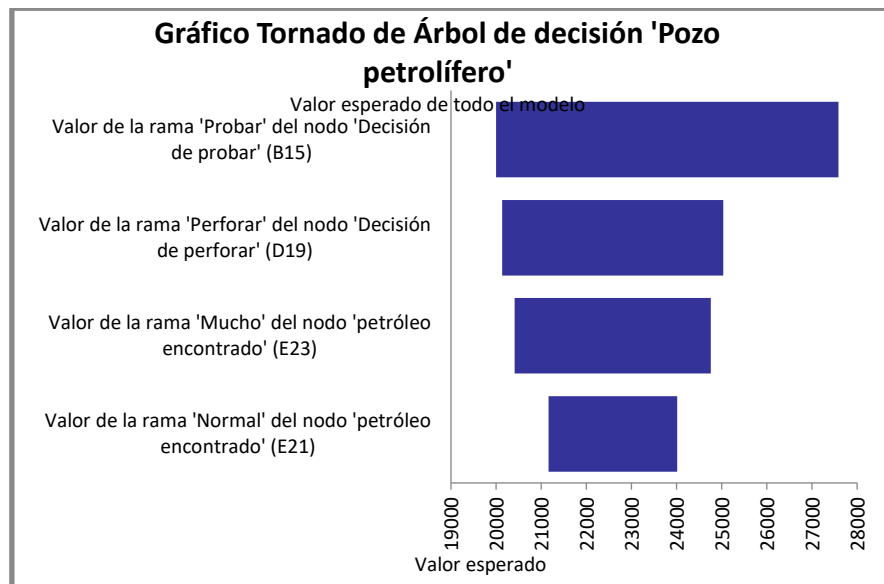


Gráfico 5: Gráfica de Tornado Ejemplo 5 “Petróleo”

Fuente: (Adaptado de Palisade Corporation, 2018).

El **gráfico de araña** indica el % de variación del valor esperado para cada una de las variables modificadas. Hay una línea por cada variable y la gráfica muestra cuál es la más sensible al cambio, que para este caso es la del costo de la prueba geológica, ya que la pendiente de esta variable es la más pronunciada, es decir, un cambio menor en el porcentaje del costo de la prueba genera una mayor variación en el valor esperado.

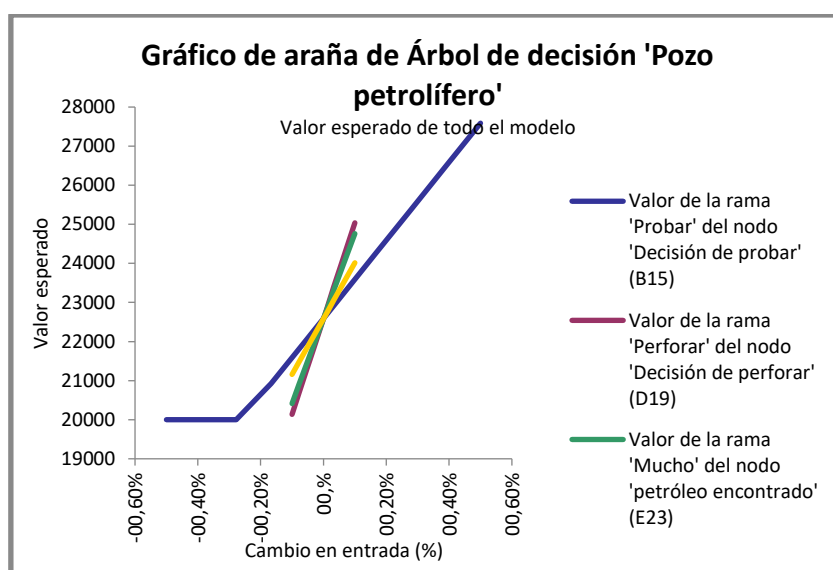


Gráfico 6: Gráfica de araña Ejemplo 5 “Petróleo”

Fuente: (Adaptado de Palisade Corporation, 2018).

La herramienta también permite hacer análisis de sensibilidad de dos direcciones, lo que permite analizar cómo varía el valor esperado a la combinación de dos variables de entrada simultáneamente. Para esto se realizan los siguientes pasos:

1. Se da clic en el ícono análisis de sensibilidad, en “Tipo de análisis” se selecciona “Sensibilidad en dos direcciones”.

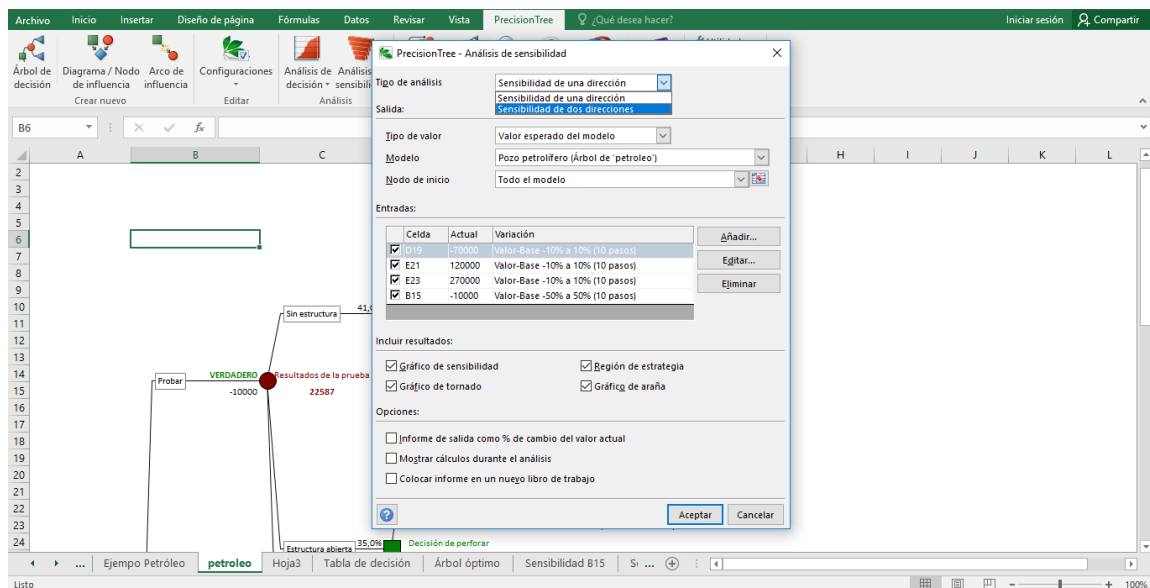


Ilustración 44. Análisis de sensibilidad en dos direcciones. Ejemplo 5.

Fuente: (Adaptado de Palisade Corporation, 2018).

2. Elegir y dar parámetros a las variables que se van a variar al mismo tiempo. Para el ejemplo se varían las variables: costo de la prueba y costo de perforar. Se elige en qué eje se desea ver en cada una de las variables en el gráfico 3D que sale como resultado del análisis, en el ejemplo se pondrá el valor de perforar (-70.000) en el eje X y el costo de la prueba (-10.000) en el eje Y.

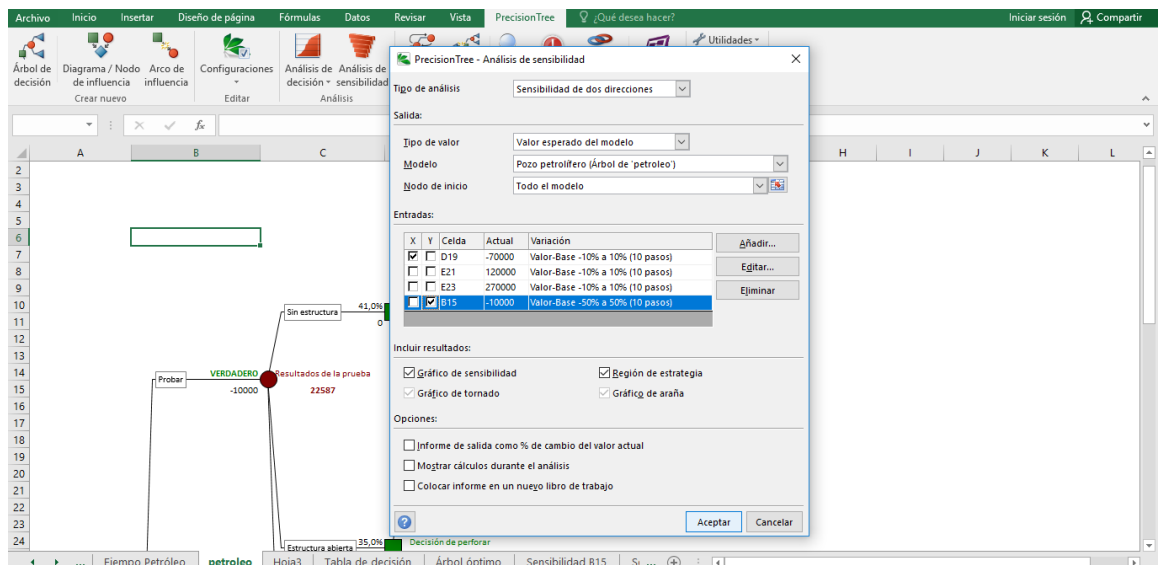


Ilustración 45. Elección entradas análisis de sensibilidad en dos direcciones Ejemplo 5.

Fuente: (Adaptado de Palisade Corporation, 2018).

- Después se da clic en aceptar y se obtienen los resultados de la prueba. El análisis encuentra un valor esperado para cada posible combinación de valores entre las dos variables en la gráfica de sensibilidad (Gráfica 7), se muestra el costo de perforar en el eje X, el costo de la prueba en el eje Y, el costo del modelo en el eje Z.

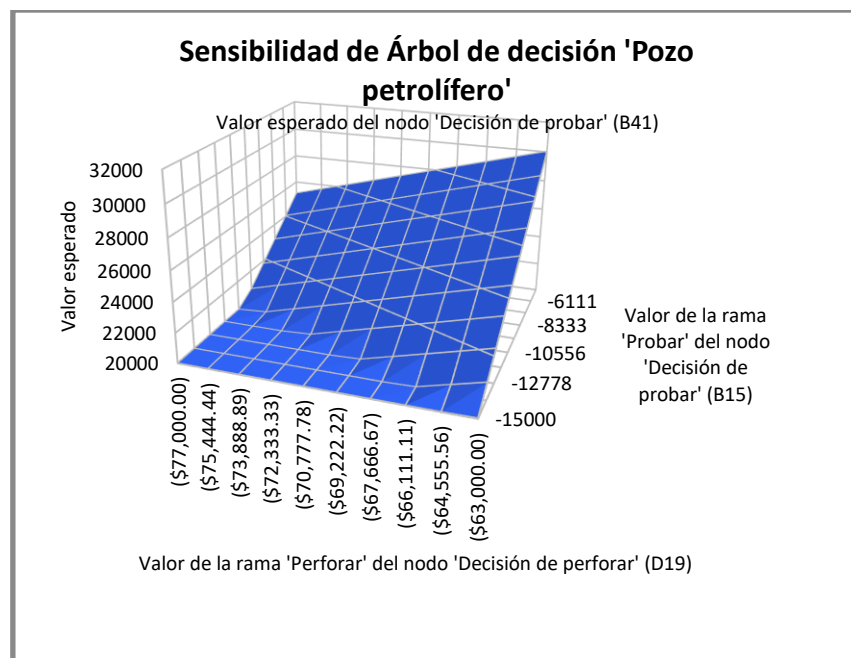


Gráfico 7: Gráfica 3D Análisis de sensibilidad en dos direcciones Ejemplo 5 “Petróleo”

Fuente: (Adaptado de Palisade Corporation, 2018).

El gráfico de región de estrategia muestra (Gráfica 8) qué decisión se debe tomar, triángulo para no probar y cuadrado para probar, para cada combinación de valores.

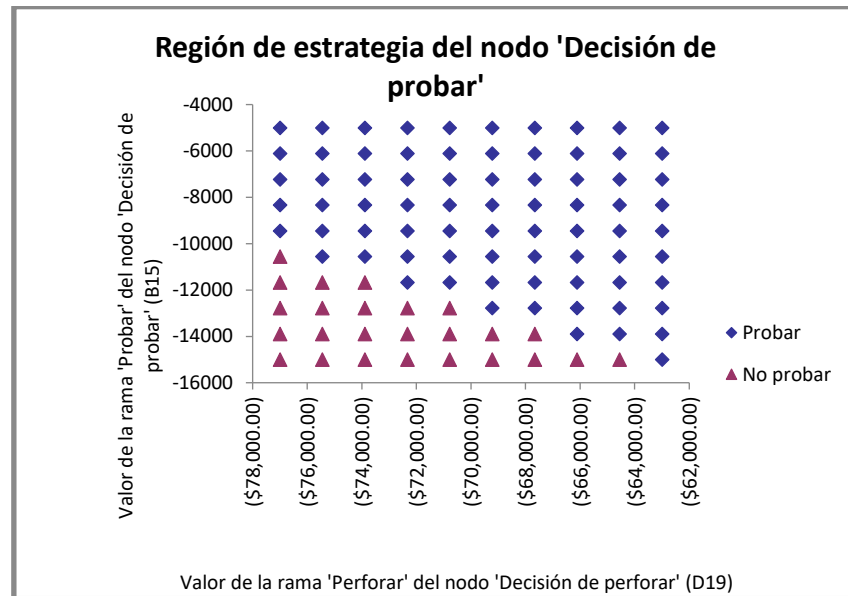


Gráfico 8: Gráfica región de estrategia Análisis de sensibilidad en dos direcciones Ejemplo 5 “Petróleo”

Fuente: (Adaptado de Palisade Corporation, 2018).

El complemento de Precision Tree permite combinarse con @RISK, logrando asociar una distribución de probabilidad a las variable o nodos que tienen incertidumbre, lo que permite hacer un análisis más acercado a la realidad. Cuando se realiza una simulación con @RISK, este toma una muestra para cada función asignada a las variables en cada iteración de la simulación. El valor y/o decisión óptima cambia al ejecutar y recalculer los diferentes nodos y con los diferentes valores de las muestras generadas al azar, lo que genera un rango de posibles valores para el árbol (Palisade Corporation, 2018).

Para el ejemplo que se ha trabajado, sobre el pozo de petróleo, se supone que no se tiene el valor de probabilidad para el resultado final, cuando al perforar se

encuentra un pozo normal, ni para pozo con mucho petróleo, por lo que para esas ramas se atribuyen distribuciones Normal con media de \$120.000 dólares y \$270.000 dólares, respectivamente, y una desviación de \$10.000 para ambas ramas, como valor de salida se define el valor del árbol entero.

1. Para introducir la distribución se selecciona la celda donde está el beneficio para el pozo normal y se da clic al complemento @RISK. Luego le da clic al ícono de definir distribución.

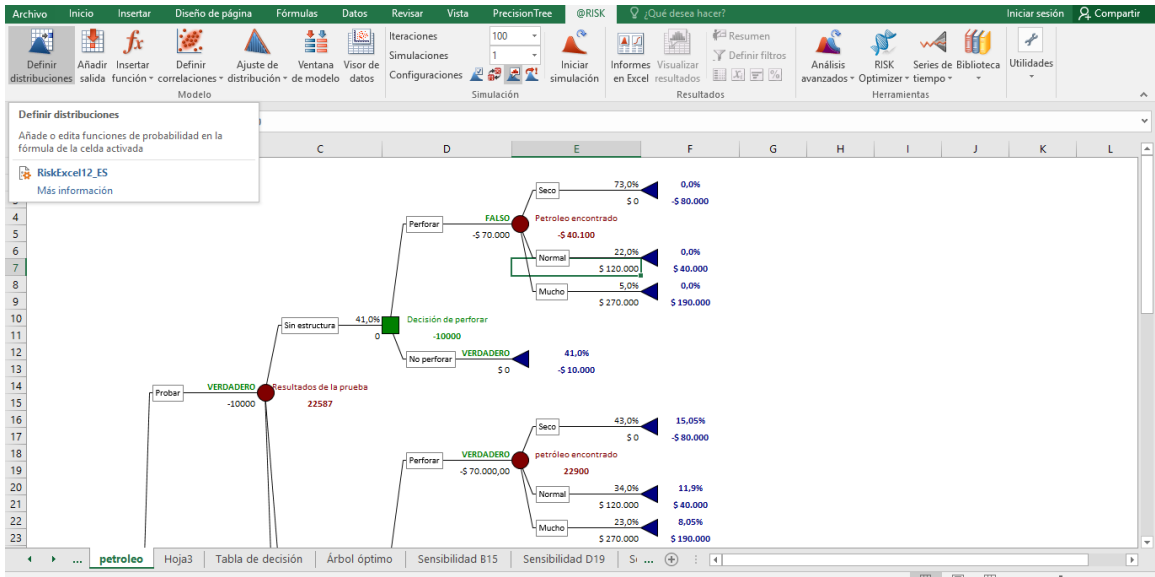


Ilustración 46. Asignar distribución con @Risk Ejemplo 5.

Fuente: (Adaptado de Palisade Corporation, 2018).

2. En @RISK podemos elegir entre diferentes distribuciones, para este ejemplo se elige la distribución Normal, se selecciona la distribución haciendo clic en el botón “Seleccione la distribución”. En la ventana emergente al lado izquierdo, se asignan las características de la distribución, y luego se da clic en aceptar.

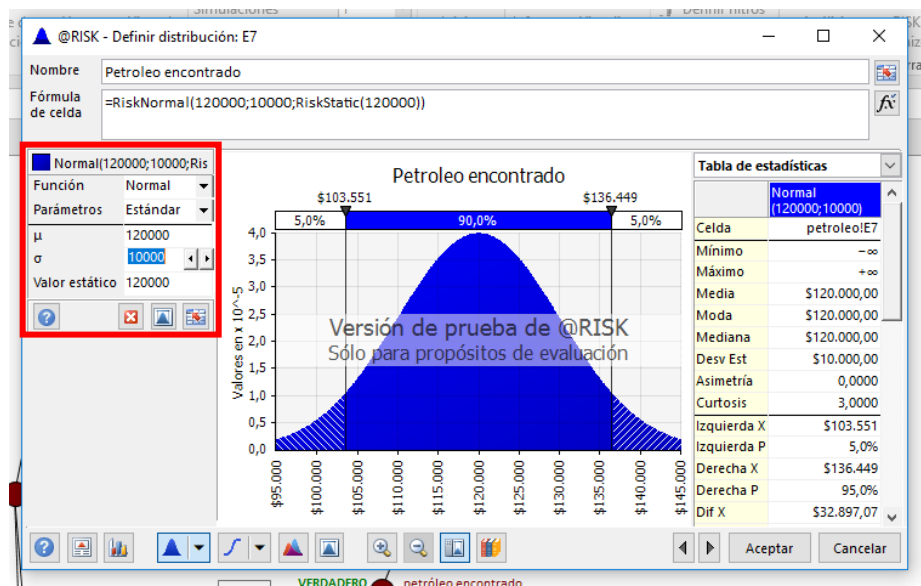


Ilustración 47. Asignar valores a una distribución con @Risk Ejemplo 5.

Fuente: (Adaptado de Palisade Corporation, 2018).

- Para definir la salida del estudio de @risk se selecciona la celda de decisión de probar, se da clic en el icono Añadir salida, y en la ventana emergente, se da acepta al elegir correctamente la salida.

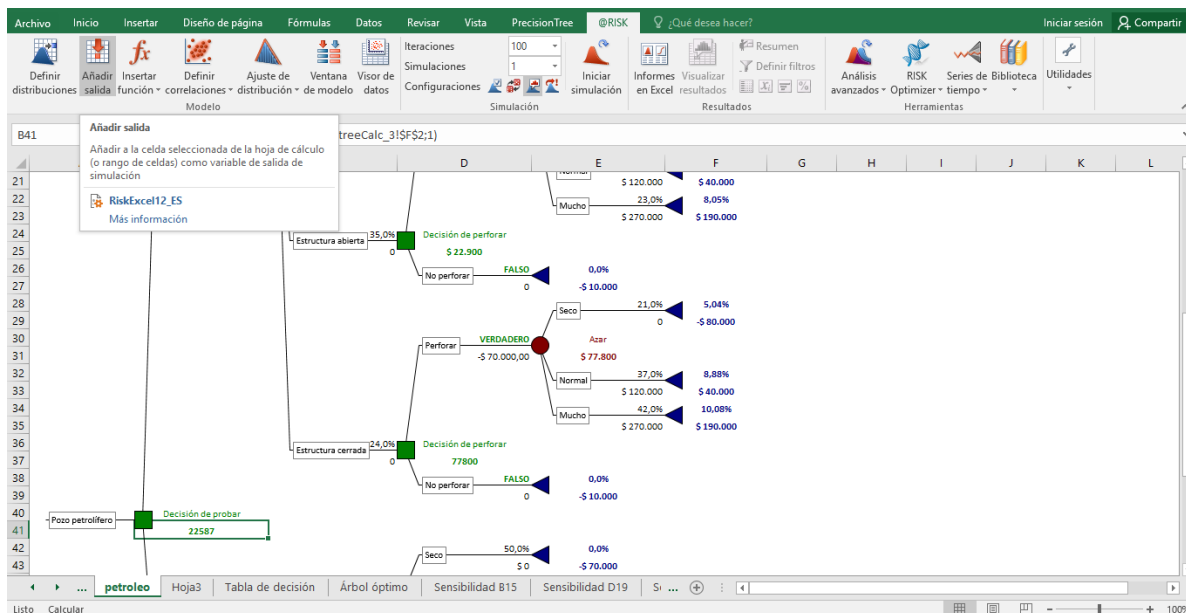


Ilustración 48. Asignar salidas distribución con @Risk Ejemplo 5.

Fuente: (Adaptado de Palisade Corporation, 2018).

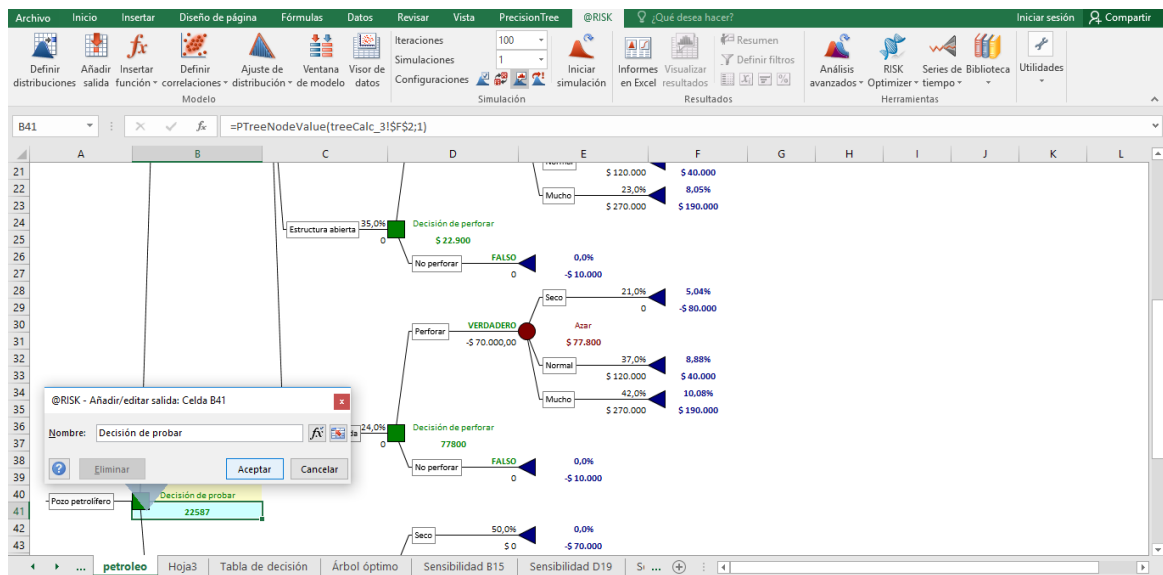



Ilustración 49. Confirmar salidas de @Risk Ejemplo 5.

Fuente: (Adaptado de Palisade Corporation, 2018).

4. Para ejecutar la simulación Montecarlo en @RISK, se elige un número de iteraciones en la Barra de herramientas de @RISK. Para este caso ponemos 1.000. Se da clic en “Mostrar Gráfica de salida automáticamente”  y por último clic en el ícono de Iniciar Simulación.

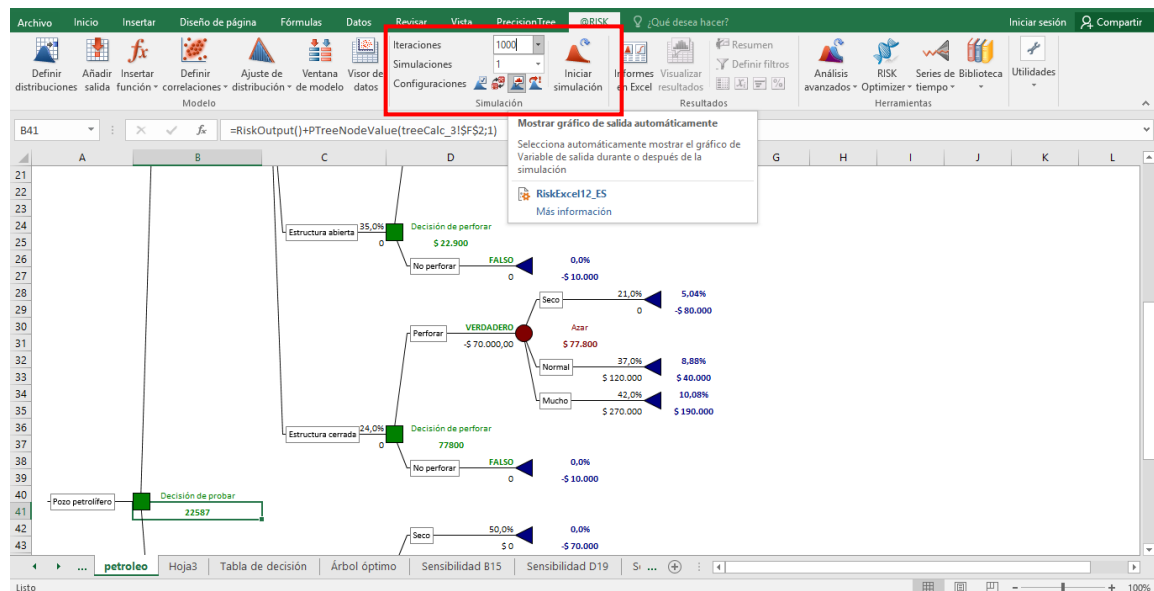


Ilustración 50. Simulación Montecarlo con @Risk Ejemplo 5. Fuente: (Adaptado de Palisade Corporation, 2018).

Al dar clic en el ícono para iniciar la simulación se ve cómo se mueven las variables, y el resultado en la pantalla se puede ver el % de ejecución de la simulación y el tiempo.

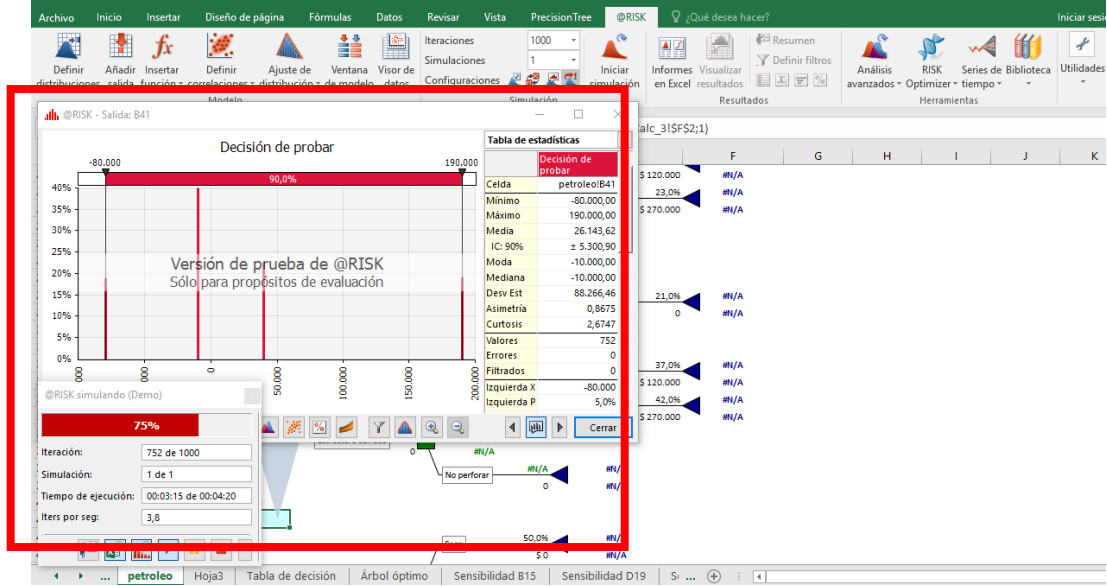


Ilustración 51. Ejecución Montecarlo con @Risk Ejemplo 5.

Fuente: (Adaptado de Palisade Corporation, 2018).

El resultado de la simulación es una gráfica en la que vemos los posibles resultados y las probabilidades relativas.

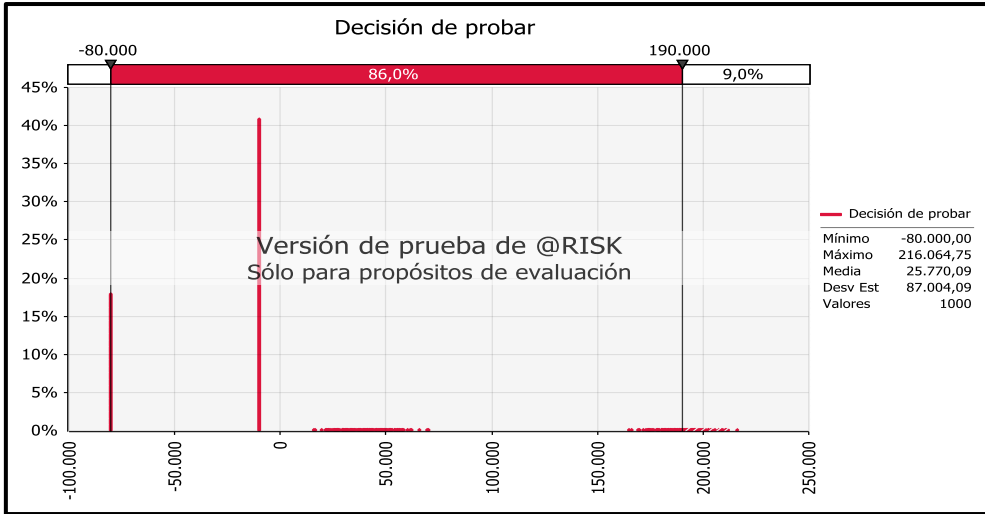


Ilustración 52. Resultado simulación Montecarlo con @Risk Ejemplo 5.

Fuente: (Adaptado de Palisade Corporation, 2018).

En la parte izquierda se encuentra el costo de la prueba sin encontrar petróleo, el cual está entre \$50.000 y \$100.000 con una probabilidad de casi un 20% de que ocurra.

La probabilidad más alta (40%), la tiene la prueba sin perforación, lo que puede tener un costo de aproximadamente \$10.000.

Luego aparece el rango de valores para la variable de encontrar petróleo Normal y por último la distribución de encontrar mucho petróleo, la probabilidad para esos es muy baja, sin embargo es lo que mas beneficio puede traer, ya que para las barras más grandes solo se tienen pérdidas.

9. Conclusiones

- Siempre que se tenga que tomar una decisión condicionada, los árboles de decisión son una herramienta útil, ya que permiten ver, de una manera gráfica, las opciones, probabilidades y resultados que se tienen a la hora de tener que elegir.
- Los árboles de decisión son una herramienta muy popular, ya que son fáciles de entender y permiten visualizar gráficamente las diferentes opciones para una existente a la hora de tomar una decisión.
- Los árboles de decisión en la actualidad son muy usados en ámbitos como toma de decisiones, evaluación de proyectos, análisis de riesgos, minería de datos, inteligencia artificial, administración de operaciones, entre otros.
- El *PMBOK®* nos muestra esta herramienta como una buena opción para la evaluación de situaciones en los proyectos de riesgos. Esta herramienta se puede usar en proyectos, tanto grandes como pequeños, ya que es útil para resolver problemas pequeños que se presentan en el día a día como para evaluar una decisión o probabilidad de ocurrencia de algo en el mediano y largo plazo.
- Los árboles de decisión se pueden combinar fácilmente con otras herramientas de la toma de decisiones, por ejemplo, resulta muy útil el

método de probabilidad bayesiana o probabilidad condicional, ya que permite conocer la probabilidad de un resultado, dada una serie de resultados a una prueba determinada, es decir, vincular la probabilidad de X dado que ocurra Y.

- Al someter un árbol de decisión a un análisis de sensibilidad, ya sea de una o dos direcciones.
- Al combinar los árboles de decisión con distribuciones estadísticas por medio de @RISK, se permite analizar el modelo de forma real y el análisis mejora mediante la representación de rangos continuos de resultados esperados para variables que son inciertas
- En ocasiones los árboles de decisión se pueden volver extensos debido a la cantidad de variables inciertas que se tienen, lo que vuelve un poco complejo su análisis, por lo que en algunas ocasiones se debe optar por usar un método diferente para la toma de decisiones.

10. Referencias

- Amaya, J. A. (2010). *Toma de Decisiones Gerenciales -Métodos cuantitativos para la administración*. Bucaramanga: Ecoe ediciones.
- Aquino. (20 de Enero de 2014). <http://www.eoi.es>. Obtenido de <http://www.eoi.es: http://www.eoi.es/blogs/madeon/2014/01/20/el-arbol-de-decisiones-en-el-analisis-de-riesgos-del-proyecto/>
- Aquino, N. M. (20 de Enero de 2014). *Escuela de Organización Industrial*. Obtenido de Escuela de Organización Industrial: <http://www.eoi.es/blogs/madeon/2014/01/20/el-arbol-de-decisiones-en-el-analisis-de-riesgos-del-proyecto/>
- Arteaga, Rodriguez Ricardo; Zapatero, Rodriguez Miguel A; Lopez, Jimeno Carlos; Camara, Rascon Angel y otros . (1997). *Manual de Evaluación Tecnico-Economica de Proyectos Mineros de Inversión*. Madrid : Ministerio de Medio ambiente.
- Bouza, C. N., & Santiago, A. (2013). *Modelación matemática en fenómenos del medio ambiente y la salud*. Mexico: Dirección de Ciudad y enseñanza en salud, Secretaría de salud del estado de tabasco.
- Calancha Zuniga, N. A., Carrión Bárcena, R. B., Cori Vargas, R. M., & Villa Torres, R. F. (2010). Breve aproximación a la Técnica de Árbol de Decisiones. *Breve aproximación a la Técnica de Árbol de Decisiones*. Cusco, Cusco, Peru.
- Castellanos, L. (12 de 06 de 2017). <https://luiscastellanos.wordpress.com>. Obtenido de <https://luiscastellanos.wordpress.com: https://luiscastellanos.wordpress.com/2007/06/12/arboles-y-tablas-de-decision/>
- Corpxcoach*. (4 de Julio de 2013). Obtenido de www.corpxcoach.com
- Coss, B. R. (2015). *Analisis y evaluación de proyectos de inversión* . Mexico: Limusa.
- Duverge, P. R. (17 de Diciembre de 2012). *EOI Escuela de organización Industrial*. Obtenido de EOI Escuela de organización Industrial: <http://www.eoi.es/blogs/mintecon/2012/12/17/una-parte-de-la-docena-de-herramientas-colaborativas-para-la-gestion-de-proyectos/>

- Equipo Auditoool. (28 de Febrero de 2014). *www.auditoool.org*. Obtenido de *www.auditoool.org*: <https://www.auditoool.org/blog/control-interno/2569-tecnicas-de-evaluacion-de-riesgos-tecnica-de-evaluacion-delphi>
- Fernández, M. F. (2011). Gestión de la Planificación de los Riesgos del Proyecto. *Gestión de la Planificación de los Riesgos del Proyecto* (págs. 11-14). San Jose, Costa rica: Universidad para la cooperacion Internacional .
- Franklin, F. E. (2011). Toma de decisiones empresariales. *Contabilidad y negocios - Revista del Departamento Academico de Ciencias Administrativas volumen 6 , Número 11*, 113 - 120.
- Gastaldi, C., Urrea, M., & Fernández de Córdoba, P. (1998). *emis*. Obtenido de <https://www.emis.de>: <https://www.emis.de/journals/DM/v61/art5.pdf>
- González, D. J. (2015). <http://www.tdx.cat>. Obtenido de <http://www.tdx.cat>: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/325427/TJRGD1de1.pdf;jsessionid=916F4061B8E09F891E9328854496CF91?sequence=1>
- Hernandez, Y. S. (19 de 07 de 2015). <http://construccion3f.blogspot.com.co>. Obtenido de <http://construccion3f.blogspot.com.co/2015/07/equipo-2-arbol-de-decision.html>: <http://construccion3f.blogspot.com.co/2015/07/equipo-2-arbol-de-decision.html>
- Hiller, F. S., Hiller, M. S., & Lieberman, G. J. (2002). *Métodos cuantitativos paea la administración* . Mexico D.F: Mc Graw Hill.
- Hulett, D. T. (Mayo de 2006). *Hulett & Assocotes*. Obtenido de Projectstik: http://www.projectrisk.com/decision_trees_for_important_project_decisions.html
- Intaver Institute Inc. . (s.f.). *www.intraver.com*. Obtenido de *www.intraver.com*: http://www.intaver.com/Articles/Article_DecisionTree.pdf
- Intaver Institute Inc. (s.f.). *www.intaver.com*. Obtenido de *www.intaver.com*: http://www.intaver.com/Articles/Article_DecisionTree.pdf
- Krajewski, L. J., & Ritzman, L. P. (2000). *Administración de Operaciones: estrategia y analisis*. Pearson Educación.
- Leza, R. S. (2010). ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS . *1° Congreso latinoamericano y 3° Nacional de seguridad, salud ocupacional y medio ambiente en la industria de petroleo* (pág. 4). Salta- argentina : Instituto argentino del petroleo y Gas .

- Mangani, F. R. (2015). Teoría de la Decisión - Arbol de Decisión ., (págs. 5, 6, 7). Argentina.
- Matsudo, N. L. (1991). Arboles de decisión, una técnica de data meaning. Buenos Aires , Argentina.
- Mesa, L. O., Rivera, M., & Romero, J. A. (2011). Descripción general de la Inferencia Bayesiana y sus aplicaciones en proceso de gestión. *Laboratorio de modelaiento y simulación Edición 2, 3, 8, 9.*
- Palisade Corporation. (2018). <http://www.palisade-lta.com/>. Obtenido de <http://www.palisade-lta.com/risk/>
- Palisade Corporation. (2018). <http://www.palisade-lta.com/PrecisionTree>. Obtenido de <http://www.palisade-lta.com/PrecisionTree/5/tips/es/gs/12.asp>: <http://www.palisade-lta.com/PrecisionTree/5/tips/es/gs/12.asp>
- Project Management Institute. (2013). *Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (Guía del PMBOK®) — Quinta edición.* Pensilvania: Project Management Institute.
- Project Management Institute Inc. (2013). *Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (Guía del PMBOK®) — Quinta edición.* Pensilvania: Project Management Institute.
- Project Management Institute Inc. (2013). *Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (Guía del PMBOK®) — Quinta edición.* Pensilvania: Project Management Institute.
- Project Management Institute Inc. (2013). *Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (Guía del PMBOK®) — Quinta edición.* Pensilvania: Project Management Institute Inc.
- Project Management Institute, Inc. (2013). *GUÍA DE LOS FUNDAMENTOS, (Guía del PMBOK) Quinta edición.* Pensilvania: Project Management Institute, Inc.
- Project Management Institute, Inc. (2013). *Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (guía del PMBOK®) -- Quinta edición.* Pensilvania: Project manage institute (PMI).
- Project Management Institute, Inc. (2013). *Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (guía del PMBOK®) -- Quinta edición.* Pensilvania: Project Management Institute, Inc.

- Render, B., Satir, R. M., & Hanna, M. E. (2006). *Métodos cuantitativos para los negocios*. Mexico: Pearson.
- Rozo Náder, V. (2018). *Contraste entre técnicas tradicionales de inversión y valoración de opciones reales en ambientes de incertidumbre, utilizando el modelo de Black & Scholes y el método binomial*.
- Shao, S. P. (1978). *Matemáticas y métodos cuantitativos para comercio y economía*. Glenview, Illinois: Scott, Foresman and co.
- Taha, H. A. (2012). *Investigación de Operaciones*. Mexico: PEARSON.
- Vedoboto, G. L., & Diego, P. (Enero -Marzo de 2015). Opciones reales: una propuesta para valorar proyectos de I+D en centros públicos de investigación agraria. Copyright © 2015. Universidad Nacional Autónoma de México. Mexico, Mexico DC, Mexico.
- Vélez, P. I. (2003). *Decisiones empresariales bajo riesgo e incertidumbre*. Bogotá: Norma.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., L., M. S., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias Novena Edición*. Mexico: Pearson.
- Witten, I. H., & Eibe, F. (20015). *Data Mining, Practical Machine Learning Tools and Techniques, 2 edición*. San Francisco: ELSEVIER.