Mohamad, Jorge Alejandro ; Bence Pieres, Máximo

Análisis de decisión aplicado a la logística de transporte

Ponencia presentada en:
III Congreso Argentino de Ingeniería Industrial (COINI), 2009

ANÁLISIS DE DECISIÓN APLICADO A LA LOGÍSTICA DE TRANSPORTE

Autores: *Mohamad, Jorge Alejandro (1); Bence Pieres, Máximo (1)*
(1) Universidad Católica Argentina. Facultad de Ciencias Fisicomatemáticas e Ingeniería
E-Mail: jorge_mohamad@uca.edu.ar

RESUMEN

La aplicación del análisis de decisión nos enfrenta a tres situaciones: de certeza, de riesgo y de incertidumbre. En las situaciones de certeza las variables son determinísticas. En las situaciones de riesgo existen probabilidades conocidas asociadas a los posibles eventos que suceden. Finalmente, en las situaciones de incertidumbre encontramos eventos con probabilidades asociadas, pero no conocidas. En este trabajo analizamos la toma de decisiones bajo situaciones de riesgo, aplicándola a las redes de transporte logísticas, mediante la técnica de árboles de decisión.
La técnica de árboles de decisión suele emplearse para proyectos de localización, ampliaciones de planta, evaluación de proyectos de riesgo, etc. Desarrollaremos una aplicación poco común: la logística de transporte.
A modo introductorio, planteamos dos aproximaciones para la selección de rutas: la programación matemática y el uso de probabilidades. La “variable crítica”, que se busca minimizar, para el primer método es la distancia, mientras que para el segundo es el tiempo.
El presente trabajo busca formular un método capaz de combinar estas dos variantes, con el objetivo de optimizar la actividad del transportista minimizando los costos.

Palabras clave: Transporte; Demoras; Decisión.

INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, los problemas de transporte son resueltos mediante métodos de programación matemática. Consideremos el siguiente caso: Un camión debe transportar una carga desde la ciudad A hasta la B. Las ciudades C y D se encuentran entre las ciudades A y B. El mapa de rutas se muestra a continuación en la Figura 1.

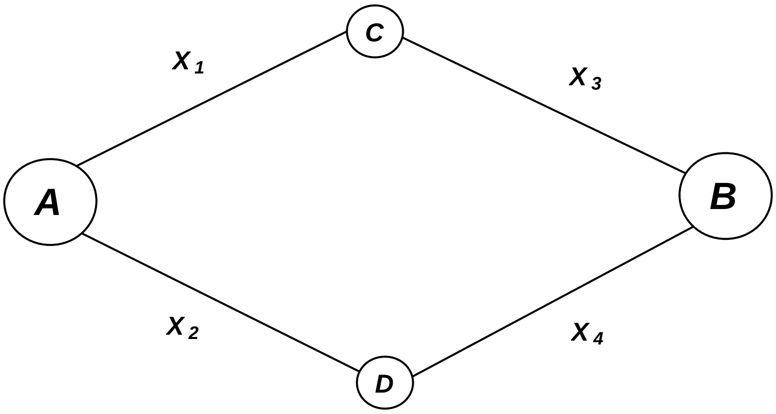

Figura 1: Red inicial de Transporte

Cada ruta entre dos nodos tiene una distancia asociada. Por ejemplo, la ruta X_1 toma un valor de 6 kilómetros. El camino que debe recorrer el transportista será la combinación de rutas que minimice la distancia recorrida en el trayecto de la ciudad A a la B.

El modelo planteado por programación matemática es el siguiente:
Definición de variables:

I_i: (0;1) , variable binaria que corresponde a la activación de la ruta i
X_i: parámetro de tipo continuo que corresponde a los kilómetros de la ruta i

Función objetivo:
$Z = X_1.I_1 + X_2.I_2 + X_3.I_3 + X_4.I_4$ (Mínimo)

Condiciones de vínculo:
$I_1 + I_2 = 1$ (Nodo A)
$I_1 - I_3 = 0$ (Nodo C)
$I_2 - I_4 = 0$ (Nodo D)
$I_3 + I_4 = 1$ (Nodo B)

Sean:

Ruta	**Distancia**
X_1	6
X_2	5
X_3	4
X_4	2

Resolviendo matemáticamente, obtenemos la solución:
$I_2 = 1$; $I_4 = 1$; $Z = 7$. De lo que resulta que el camino óptimo es la ruta: X_2 - X_4; con un recorrido de 7 km.

Consideremos ahora el mismo problema, pero esta vez, cada una de las rutas tiene asociada una probabilidad de demora.
En general, $P(D_i)$ es la probabilidad de que el transportista se demore en la ruta i. Para la ruta X_1: $P(D_1)$.
El criterio de selección consistiría en elegir el camino que minimice la probabilidad de demora.
Para resolver el problema por probabilidades, se necesitará conocer la probabilidad de demora de cada camino posible. En el caso presentado, hay solo dos caminos posibles.
Para obtener la probabilidad objetivo, se procederá definiendo todos los estados posibles que pueden suceder en el recorrido del transportista.

Consideremos el camino X_1- X_3. Los posibles sucesos son:
1. Que haya demora solo en la ruta 1
2. Que haya demora solo en la ruta 3
3. Que haya demora en la ruta 1 y también en la 3
4. Que no haya demora en ninguna de las dos rutas

Para poder definir el problema matemáticamente se procede a identificar las probabilidades de los sucesos mencionados anteriormente de la siguiente manera:
$P(D_i ; nD_j)$: probabilidad de que el transportista se demore en la ruta i y no se demore en la ruta j.

Con esta nomenclatura se puede expresar:
$P(D_1 ; nD_3) + P(D_1 ; D_3) + P(nD_1; D_3) + P(nD_1 ; nD_3) = 1$
Para el camino X_1- X_3, la probabilidad de demora será:
P (Demora X_1- X_3) $= P(D_1 ; nD_3) + P(D_1 ; D_3) + P(nD_1; D_3)$
Análogamente, para el camino X_2- X_4, la probabilidad de demora es:
P (Demora X_2- X_4) $= P(D_2 ; nD_4) + P(D_2 ; D_4) + P(nD_2; D_4)$

Cabe mencionar que para este enfoque se está considerando una distribución de probabilidad discreta, en la cual debe cumplirse lo siguiente:

- Existe un espacio muestral finito formado por un conjunto de eventos elementales
- La probabilidad de cualquiera de los posibles eventos permanece constante en el tiempo
- Los eventos son estadísticamente independientes

Para el caso de estudio, existirá una probabilidad $P(D_i)$ que significará la probabilidad de demora, es decir; la probabilidad de que el transportista no llegue a destino en el tiempo estipulado.
La probabilidad de "no demora" será la probabilidad de que el transportista llegue a tiempo a destino.

Para el ejemplo, se presentan los siguientes valores de probabilidad de demora para cada una de las rutas:

Ruta	**Probabilidad de demora**
X_1	0,1
X_2	0,2
X_3	0,3
X_4	0,6

Considerando independencia estadística entre las demoras de las rutas:
P (Demora X_1- X_3) = $P(D_1 ; nD_3)+ P(D_1 ; D_3)+ P(nD_1; D_3)$
$= 0{,}1.(1-0{,}3) + 0{,}1.0{,}3 + (1-0{,}1).0{,}3 = 0{,}37$
Procediendo de igual forma para el segundo camino posible:
P (Demora X_2- X_4) = $P(D_2 ; nD_4)+ P(D_2 ; D_4)+ P(nD_2; D_4)$
$= 0{,}2.(1-0{,}6)+0{,}2.0{,}6+(1-0{,}2).0{,}6 = 0{,}68$

El camino elegido por el transportista será entonces el X_1- X_3, dado que la probabilidad de demora es solo 0,37 comparado con el 0,68 que tiene asociado el camino X_2- X_4.

Tanto el método de programación matemática como el de probabilidades, elige uno de los caminos, dejando de lado la incidencia de una variable importante.
En el primer caso, no se considera el costo que implica la demora. En el segundo caso, no se considera el costo que implica un recorrido mayor.

Existen dos costos que deben tenerse en cuenta:
- Costo del transportista (proporcional a la carga y los kilómetros recorridos)
- Costo de entregar la carga con demora

Este último costo puede ser real o ficticio. Puede ser por una o varias de las siguientes causas.
1. Costo de no disponer del medio de transporte
2. Costo por el deterioro de la carga (costo de la "mala calidad")
3. Costo de penalización
4. Costo por la perdida de confianza o afinidad del cliente (disminución del "Nivel de servicio")

El presente trabajo está orientado a formular un método capaz de combinar estas dos variantes, con el objetivo de optimizar la actividad del transportista minimizando los costos. Para lograr este objetivo se empleará la técnica de los árboles de decisión.

APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE DECISIÓN AL PROBLEMA DE TRANSPORTE

Se considera a continuación el problema del transportista con una ruta adicional que une las ciudades C y D, tal como lo muestra la Figura 2.

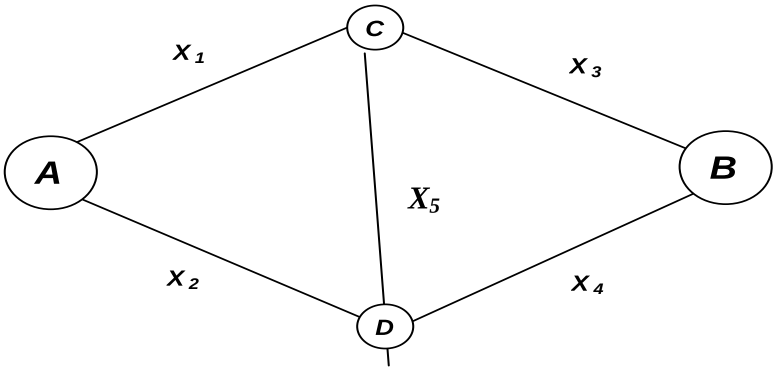

Figura 2: Red de Transporte para aplicar análisis de decisión

Ahora el transportista tiene una mayor cantidad de posibilidades para combinar rutas y elegir el camino óptimo que minimice simultáneamente la distancia a recorrer y la probabilidad de demora.
Los datos necesarios para resolver el problema serán la longitud y la probabilidad de demora de cada ruta.
Los datos del ejemplo se presentan a continuación:

Ruta	Prob. Dem.	Km.
1	0,1	6
2	0,2	5
3	0,3	4
4	0,6	2
5	0,15	2

Para resolver el problema se aplicará la técnica de **árboles de decisión**.
El objetivo es lograr, mediante este método de análisis y toma de decisiones, integrar los dos criterios de decisión presentados, es decir: el criterio de minimización del recorrido y el de minimización de la probabilidad de demora.
Por tanto, deberán definirse los dos costos asociados que permitirán decidir en función del costo esperado de cada camino posible.

1. Costo Variable por Km.: 1 $/ Km
2. Costo asociado a la demora: 5 $/ Ruta (si en una de las rutas el transportista se demora respecto al tiempo estipulado, se incurre en este costo, considerado fijo)

Las razones a las que se puede deber este costo de demora ya fueron expresadas en la Introducción.

En el caso de este ejemplo se realiza una importante simplificación para poder resolver el problema. En realidad el costo asociado a la demora debería ser una determinada cantidad de dinero por unidad de tiempo de demora del camión (no se incurre en el mismo costo por demorarse una hora en la entrega de la carga, al que se incurriría por demorarse en 2 días). Dado que en esta aproximación al planteo del modelo una de las simplificaciones contempla la distribución discreta de la probabilidad de demora (los posibles sucesos son “demora” o “no demora”), se considera un solo costo que, independientemente a la magnitud de la demora del camión en una ruta, aumenta el costo de esa ruta en un valor fijo.

Se procede a continuación a trazar el árbol de decisión.
La decisión debe tomarse en el “tiempo cero” desde la ciudad A. La opciones que tiene el transportista son tomar la ruta X_1 o la ruta X_2. Por lo tanto, es ahí donde aparece el primer nodo de decisión.
Siguiendo por la ruta $X_{1,}$ habrá ahora un nodo de evento, que indicará dos posibles sucesos: que el transportista se demore o que no se demore en la ruta X_1. El primer suceso tiene una probabilidad de 0.1, y dado que los sucesos son mutualmente excluyentes, la probabilidad del segundo suceso será de 0.9.
Cualquiera de los dos eventos que suceda, el transportista deberá tomar otra decisión al finalizar la ruta X_1: ¿Sigue su camino a la ciudad B por la ruta X_3 o por la ruta X_5?
Para esto se dibuja otro nodo de decisión en cada una de las ramas.
Otra vez, no importa qué camino elija el transportista, cada ruta tendrá su probabilidad de demora asociada.
En caso de que el transportista haya elegido el camino que conforman las rutas X_1 y X_3, habrá llegado a destino (la ciudad B), por tanto, ya no deben tomarse más decisiones sobre esta rama.
Se trabaja ahora con la rama que corresponde a la ruta X_5. En el mapa geográfico, puede observarse cómo en el nodo D, en el que convergen las rutas X_2, X_5 y $X_{4,}$ el transportista, finalizando el recorrido de la ruta X_5 y viniendo de la ruta $X_{1,}$ tiene la opción de tomar la ruta X_4 que lo lleva a la ciudad B o de tomar la ruta X_2 que lo lleva de regreso a la ciudad A. Obviamente, el objetivo del problema es llegar la ciudad B, no a la A, por tanto la rama correspondiente será eliminada (se simboliza tachando la rama correspondiente). La Figura 3 muestra el trazado parcial del árbol de decisión.

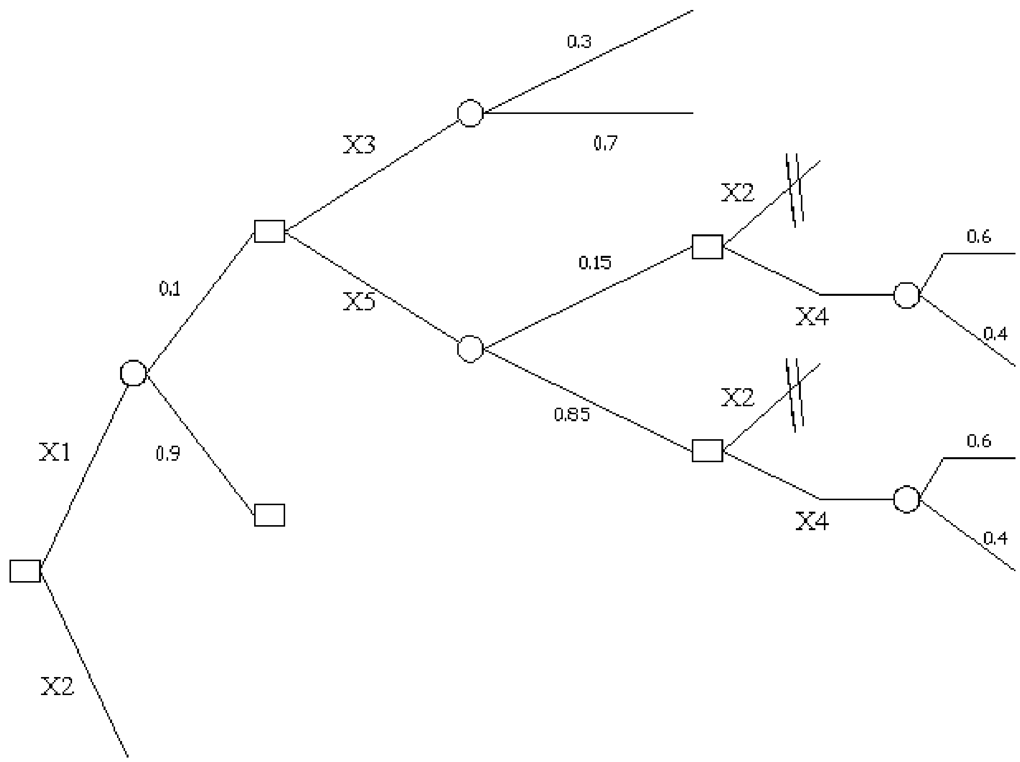

Figura 3: Trazado parcial del árbol de decisión

El árbol ya tiene dos posibles caminos: el X_1-X_3 y el X_1-X_5-X_4. En la figura puede verse que el árbol fue trazado solo para el caso en que hay demora en la ruta X_1. El trazado del árbol para el caso en que no hay demora en la ruta X_1 será exactamente igual al dibujado en caso de demora. Por tanto, para evitar que se haga engorroso el trazado del árbol, se identificarán los nodos de decisión que se repitan (con la letra A los correspondientes a la rama X_1 y con la letra B los correspondientes a la rama X_2).
Se procede de manera análoga a la explicada anteriormente para el trazado de la rama X_2.

Puede observarse en la Figura 4 el trazado completo del árbol de decisión correspondiente a este caso.

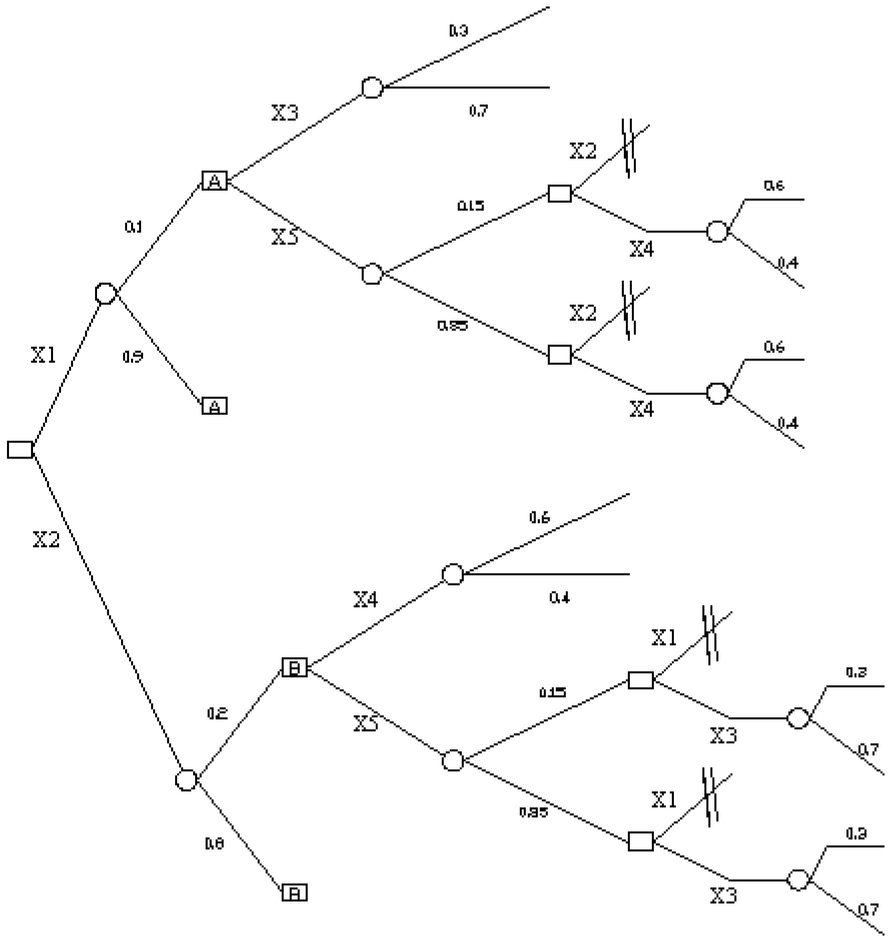

Figura 4: Trazado completo del árbol de decisión

Puede verificarse que el árbol contiene todos los caminos posibles a seguir por el transportista.

Al finalizar el recorrido de cada rama –equivalente a completar un camino posible por el transportista- se dispondrá de su correspondiente “consecuencia ó valor económico”, el cual será el resultado de los costos debidos a la distancia recorrida, más los debidos a las demoras asociadas con ese camino. Para el caso de no haber demoras, el único valor económico asociado será el que corresponde al costo por kilómetro. En el caso de haber una demora, el valor económico asociado será la suma del costo variable por kilómetro y el costo de demora.

Debe evaluarse a continuación, con el criterio del valor monetario esperado, cuál es el camino que optimiza los recursos del transportista. Este procedimiento se realiza de derecha a izquierda, recorriendo todas las ramas del árbol hasta llegar a la decisión inicial.
Cada nodo de evento tendrá un valor monetario esperado (su media estadística), que se calculará sumando los productos de la probabilidad de cada evento posible por el valor económico asociado al mismo.

A modo de ejemplo (para la ruta X_5):
Los valores económicos asociados a cada rama se colocan al final de la misma. El valor monetario esperado del nodo de evento, se coloca sobre el nodo mismo, tal como puede observarse en la Figura 5 para el cálculo de la ruta X_5.

Valor Económico de la rama: (X_1 (con demora) ➔ X_5 (con demora) ➔ X_4 (con demora)) =

= ((6 km * 1 $/km) + 5 $/Ruta) + ((2 km * 1 $/km) + 5 $/Ruta) + ((2 km * 1 $/km) + 5 $/Ruta) =
= $25

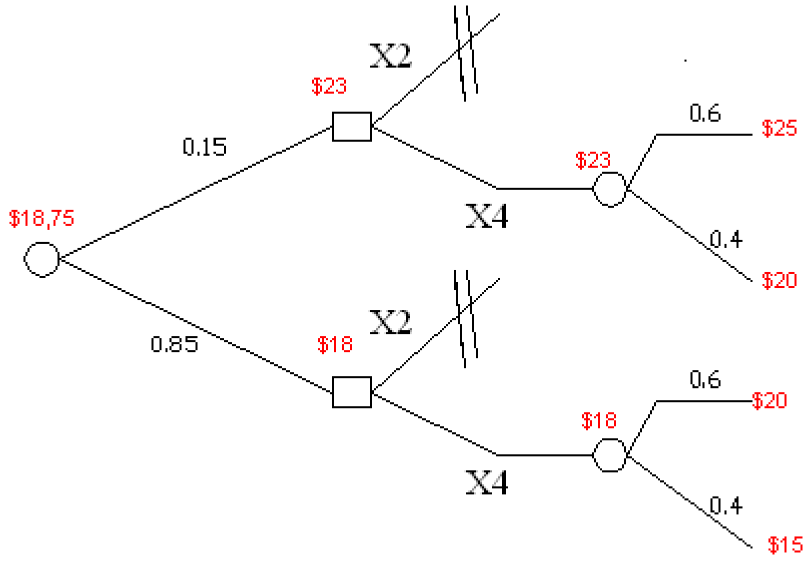

Figura 5: Ejemplo de cálculo del valor monetario esperado para la ruta X5

VME_1 = $25 * 0,6 + $20 * 0,4 = $23
VME_2 = $20 * 0,6 + $15 * 0,4 = $18
VME = $23 * 0,15 + $18 * 0,85 = $18,75

Se continúa calculando el valor monetario esperado del otro nodo de evento (ruta X_3).

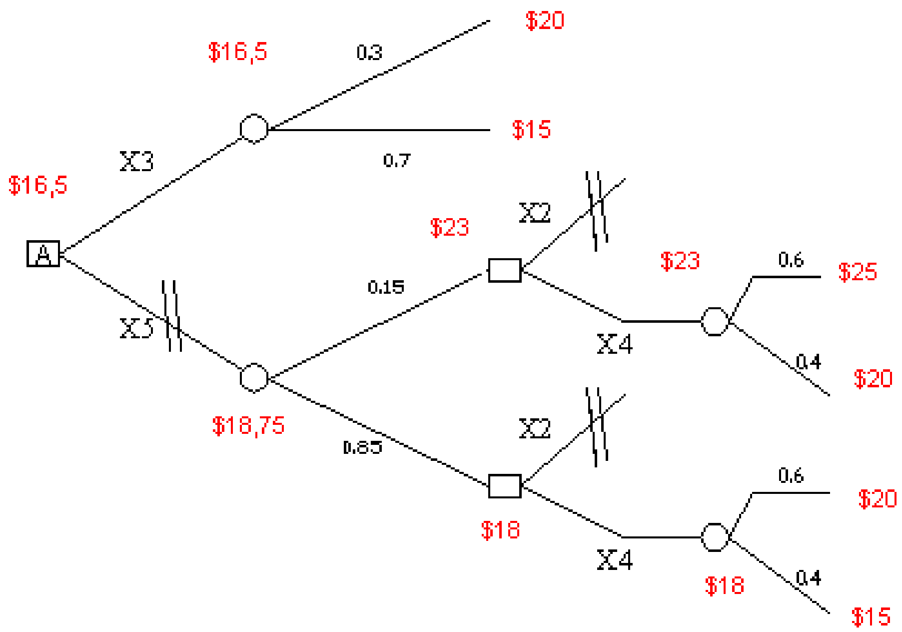

Figura 6: Cálculo del valor monetario esperado para la ruta X3 y nodo de decisión X3 ó X5

Al llegar al nodo de decisión (X_3 ó X_5) se descarta ("poda") la rama X_5 dado que tiene mayor valor monetario esperado que la rama X_3 (recordemos que el objetivo es decidir por el valor menor debido a que las consecuencias económicas se tratan de Costos), esto puede visualizarse en la Figura 6. El valor resultante del nodo de decisión A es ahora $16,5. Esto permite continuar la operatoria calculando el valor monetario esperado para la ruta X_1, tal como se muestra en la Figura 7.

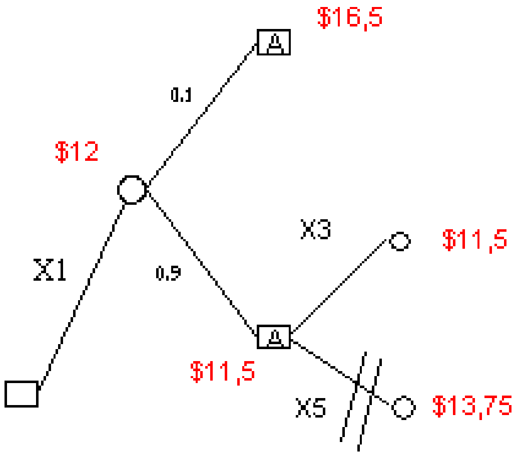

Figura 7: Cálculo del valor monetario esperado para la ruta X1

De igual manera se procede para la parte inferior del árbol (rama correspondiente a la ruta X_2), llegando al diagrama que se observa en la Figura 8.

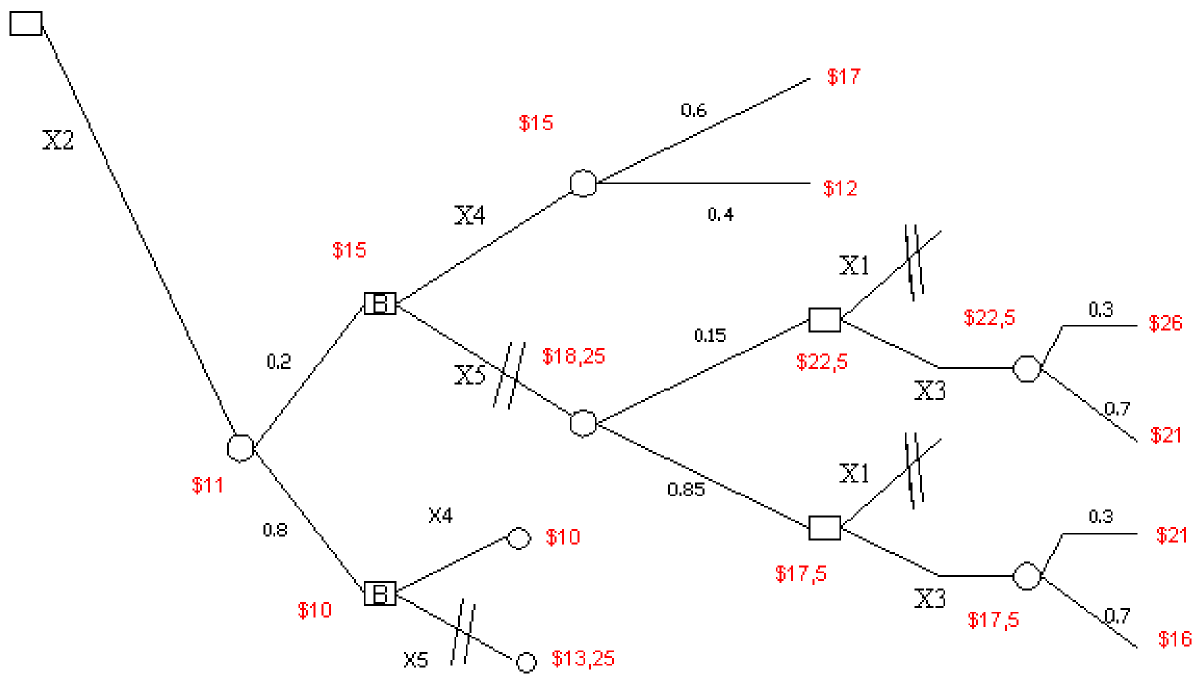

Figura 8: Cálculo del valor monetario esperado para la ruta X2

Dado que la rama X2 tiene un valor monetario esperado de $11, menor que el de la rama X1 que es de $12, se decide adoptar la ruta X2.
El transportista, al elegir el camino a recorrer con el criterio del valor monetario esperado, estará optimizando la distancia recorrida y la demora.
El camino elegido será la combinación de rutas X_2- X_4. La trayectoria a recorrer será de 7 Km.
La probabilidad de demora se calcula a continuación:
P(Demora X_2- X_4) = P(D_2 ; nD_4)+ P(D_2 ; D_4)+ P(nD_2; D_4) = 0,2.(1-0,6)+0,2.0,6+(1-0,2).0,6 = 0,68.

La combinación de rutas que minimizan el valor monetario esperado (costos) se grafica en la red de la Figura 9.

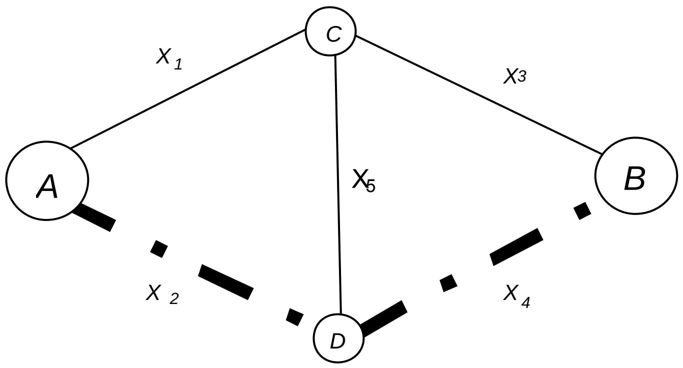

Figura 9: Red de Transporte que minimiza el valor monetario esperado

De todos los posibles caminos a tomar el transportista ha optado por un camino teniendo en cuenta dos criterios importantes:

- los kilómetros a recorrer, y

- la posibilidad de demora.

En el caso particular presentado, se elige el camino con menor trayectoria a realizar pero con una probabilidad de demora muy alta, de casi 70%.
Esto indica que, a medida que el costo por kilómetro aumenta, el árbol priorizará las rutas de menor longitud, y a medida que el costo asociado a la demora aumenta, el árbol priorizará las rutas con menor probabilidad de demora.

Esta metodología de trabajo se puede aplicar a otros modelos que incluyan consideraciones tales como:

- En lugar de dos estados posibles para cada ruta (demora o no demora), aplicar distribuciones discretas que se aproximen a la distribución de probabilidad continua que caracteriza la demora del transportista en una ruta.
- El costo de demora no sea único, sino proporcional al tiempo de demora del transportista.
- Verificar la consistencia del modelo aplicando la técnica de simulación.

CONCLUSIÓN

El modelo propuesto trabaja sobre la optimización del costo de transporte, integrado por dos componentes básicas: el costo por trayectoria y el costo por demora.
En lo que respecta al costo por demora, a partir de la técnica de los árboles de decisión; se plantean dos situaciones posibles: la demora y la no demora. Este modelo será de aplicación a situaciones de toma de decisión en las cuales el decisor es indiferente a la duración de la demora. Simplemente, si entra en esta situación; sea por unos minutos o por varias horas, estará incurriendo en un costo fijo.
Será, por ejemplo, para el caso en que un camión tenga un horario fijo asignado en una dársena de descarga. Si no llega a tiempo, perderá el lugar e incurrirá en un costo de penalización por demora. Será también aplicable a un caso en el que la carga tenga un tiempo de permanencia límite en el transporte. En ambos casos el costo por demora es único e independiente a la variable “tiempo de demora”. El costo de penalización por demora también podrá ser el costo que implica la pérdida del despacho.

Se deberá tener especialmente en cuenta, en todos los casos, la confiabilidad de los datos a partir de los cuales se obtienen las probabilidades y los costos, convirtiendo el proceso de decisión en un problema ingenieril de logística de transporte.

BIBLIOGRAFÍA

- Bence Pieres, Máximo. (2008). ***Trabajo Final de Ingeniería Industrial***. Universidad Católica Argentina.
- Dresdner, Eduardo y otros. (1997). ***Técnicas Cuantitativas: El Management científico aplicado a las decisiones en la economía de empresas***. Ediciones Universo.
- Krajewski, Lee; Ritzman, Larry. (2000). ***Administración de Operaciones: Estrategia y Análisis***. 5° Edición. Prentice Hall.
- Miranda, Miguel. (2003). ***Programación Lineal y su entorno***. EDUCA.
- Raiffa, Howard. (1970). ***Decision Analysis. Introductory Lectures on Choices under Uncertainty***. Addison-Wesley Publishing Company.