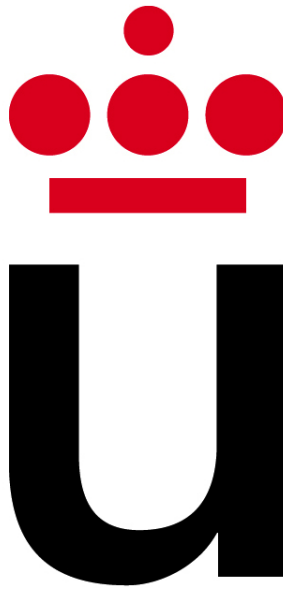


PRÁCTICA FINAL
Ingeniería de la Decisión

RUTA ÓPTIMA PARA LLEGAR AL TRABAJO

José Ignacio Escribano



MÓSTOLES, 7 DE NOVIEMBRE DE 2015

Índice de figuras

1.	Primer boceto del diagrama de influencia	2
2.	Diagrama de influencia con los arcos	3
3.	Estados y probabilidades del nodo Predicción meteorológica	4
4.	Modelo jerárquico de objetivos	5
5.	Ratings de los objetivos terminales	6
6.	Función de valor del coste	7
7.	Funciones de valor para tiempo de llegada, el número de transbordos, el tiempo de espera, personas del habitáculo, la contaminación y el ruido .	8
8.	Pesos para terrestre y subterráneo	9
9.	Pesos para tipo de transporte	9
10.	Pesos para Económicos y Confort	9
11.	Pesos para Sociales	10
12.	Asignación de pesos para Medio de transporte	10
13.	Preferencias según objetivos Económicos, Confort y Sociales	10
14.	Preferencias según objetivos terminales	11
15.	Modelo completo	11
16.	Valores del nodo determinístico Tipo de transporte	12
17.	Solución del modelo	12
18.	Árbol con la solución para condiciones de lluvia	13
19.	Árbol con la solución para condiciones de nieve	14
20.	Árbol con la solución para condiciones de niebla	14
21.	Árbol con la solución para condiciones de cielo despejado	15

Índice

1. Introducción	1
2. Resolución del problema	1
2.1. Estructuración del problema	1
2.2. Modelización de creencias	3
2.3. Modelización de preferencias	5
2.4. Optimización	11
2.5. Análisis del modelo	12
3. Conclusiones	15

1. Introducción

Habitualmente, nos desplazamos para llegar al trabajo, y tenemos, en general, varias formas de ellas hasta él. Los medios de transporte disponibles son el coche, metro, autobús y Cercanías Renfe. Nuestro objetivo es llegar lo más rápido posible, es decir, minimizar el tiempo de llegada hasta el trabajo. Supondremos que nuestro trabajo se encuentra en la ciudad de Madrid, y hasta él tenemos una distancia de 30 kilómetros (por carretera). Preferimos los medios terrestres (coche y autobús) sobre los medios subterráneos (metro y Cercanías). Además de llegar lo antes posible, también queremos tener la máxima comodidad, que sea lo más barato y que contamine lo menos posible. Si se elige los servicios de transporte (metro, autobús o Cercanías) se quiere minimizar el número de transbordos.

2. Resolución del problema

2.1. Estructuración del problema

Para resolver el problema comenzamos identificando los distintos elementos que componen el problema, esto es, identificamos los factores de incertidumbre, los objetivos conflictivos, la influencia del tiempo, los decisores y los grupos afectados:

■ Factores de incertidumbre

- Condiciones meteorológicas (lluvia, nieve, hielo, sol, ...), precio del combustible, precio de los servicios de transporte, nivel de contaminación, la predicción meteorológica

■ Objetivos conflictivos

- Minimizar el tiempo de llegada, minimizar el coste, maximizar la comodidad, preferencia de medios terrestres sobre medios subterráneos, minimizar el número de transbordos, minimizar las emisiones de CO₂.

■ Influencia del tiempo

- Condiciones meteorológicas, precio del combustible, precio de los servicios de transporte (tanto a corto como a largo plazo), día y hora en la que nos encontremos (por ejemplo, no es lo mismo ir a trabajar un domingo que habrá menos tráfico por la carretera, que un lunes por la mañana que seguramente habrá retenciones), apertura de nuevas carreteras o nuevos servicios en los medios de transporte.

■ Decisores

- Nosotros mismos

■ Grupos afectados

- Nosotros mismos, usuarios de los servicios de transporte, usuarios de coches, ciudadanos de Madrid (por la contaminación)

Una vez que tenemos identificamos los elementos del problema, procedemos a crear el diagrama de influencia.

En primer lugar, ponemos las incertidumbres, los objetivos y las decisiones (elegir medio de transporte) en GeNIe (Figura 1).

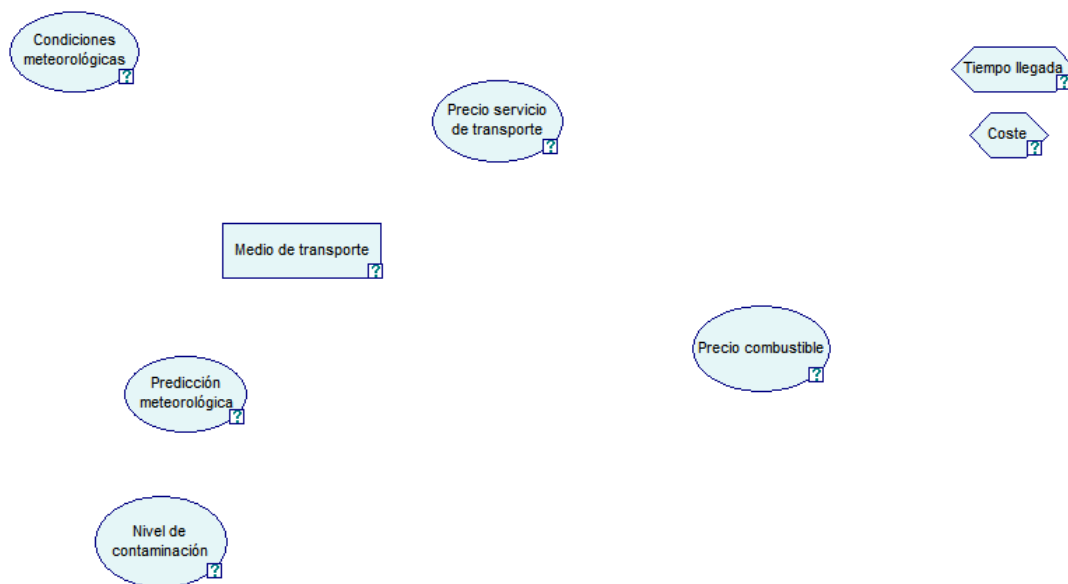


Figura 1: Primer boceto del diagrama de influencia

En este primer boceto, sólo introducimos los objetivos de minimizar el coste y el tiempo de llegada. Más adelante consideraremos los demás objetivos.

Nos queda introducir los arcos entre los nodos. Para ello, consideramos las influencias entre cada uno de los nodos (Figura 2).

Comencemos con el nodo de Condiciones meteorológicas: hay un arco entre este nodo y nivel de contaminación ya que las condiciones meteorológicas condicionan el nivel de contaminación. También hay un arco hacia el nodo de valor Tiempo llegada ya que

la meteorología influye en el tiempo que tardaremos en llegar al trabajo.

En el nodo Predicción meteorológica, tenemos un arco hacia Condiciones meteorológicas, ya que las condiciones meteorológicas vendrán determinadas por las condiciones meteorológicas.

El precio del combustible condiciona al Precio del servicio de transporte, y ambos precios afectan al objetivo del coste.

Para tomar la decisión, conocemos la predicción meteorológica, las condiciones meteorológicas actuales, los precios del combustible y de los servicios de transporte, y el nivel de contaminación.

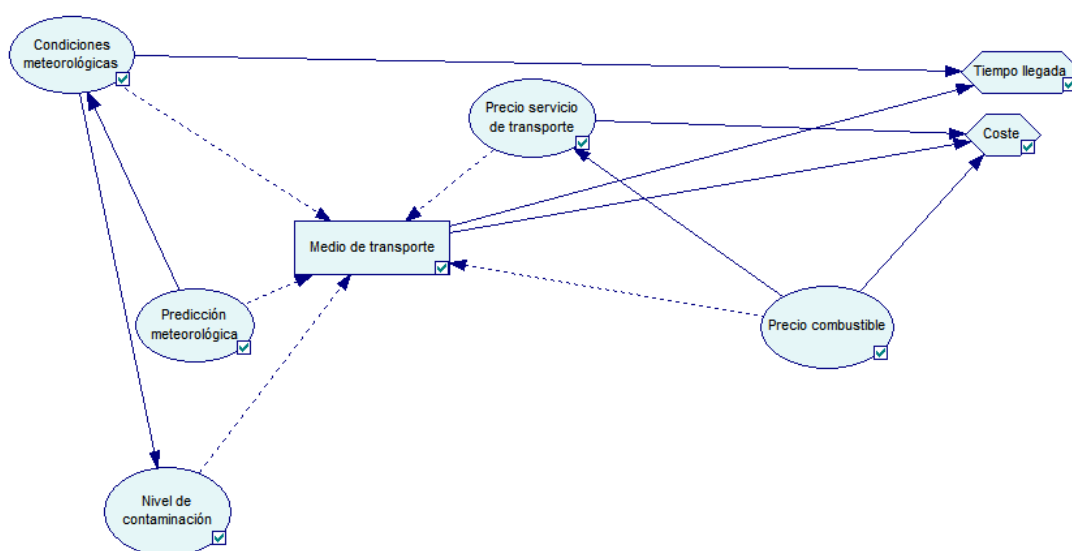


Figura 2: Diagrama de influencia con los arcos

2.2. Modelización de creencias

Ahora procedemos a asignar probabilidades a los nodos de azar.

En primer lugar consideraremos los estados de los nodos Condiciones y Predicción meteorológica. Éstos serán cuatro posibles: Lluvia, nieve, niebla y despejado.

Se sabe que la predicción de lluvia se dio el 15 % de los casos, nieve en el 5 %, niebla en el 10 % y despejado el 70 %. En la Figura 3 se puede ver cómo queda en GeNIe.

También se conocen las probabilidades de que se produzcan las condiciones meteorológicas actuales dadas las predicción (Tabla 1).

►	Prediccion_Lluvia	0.15
	Prediccion_Nieve	0.05
	Prediccion_Niebla	0.1
	Prediccion_Despejado	0.7

Figura 3: Estados y probabilidades del nodo Predicción meteorológica

Tabla 1: Probabilidades de las condiciones condicionadas a las predicciones meteorológicas

Condiciones\Predicción	Lluvia	Nieve	Niebla	Despejado
Lluvia	0.8	0.3	0.3	0.1
Nieve	0.01	0.6	0.2	0.01
Niebla	0.1	0.05	0.4	0.01
Despejado	0.09	0.05	0.1	0.88

En el nodo Precio combustible consideramos dos estados: precio alto y bajo. Diremos que el precio es alto si nos cuesta 1 litro de gasolina más de 1.20 euros. En caso contrario, tenemos un precio bajo.

Se conoce que el 70 % de los días de los últimos cinco años, el precio del combustible ha estado alto. El 30 % ha estado bajo.

Con el precio del transporte tenemos, de nuevo, dos estados: precio alto y bajo. Consideraremos que el precio del transporte es alto si la media aritmética de los transportes públicos (metro, autobús y Cercanías) es mayor a 3 euros. En caso contrario, el precio es bajo.

Se saben las probabilidades del precio del transporte público, dado el precio del combustible (Tabla 2).

Tabla 2: Probabilidades del precio del transporte condicionadas al precio del combustible

Precio transporte \Precio combustible	Precio alto	Precio bajo
Precio alto	0.75	0.5
Precio bajo	0.25	0.5

El último nodo que nos queda es el Nivel de contaminación. Tenemos dos estados contaminación alta y baja. Consideramos que el nivel es alto si se tiene una medida superior a 700 ppm (partes por millón).

Por último, conocemos la probabilidad del nivel de contaminación dadas las condiciones meteorológicas (Tabla 3).

Tabla 3: Probabilidades del nivel de contaminación dadas las condiciones meteorológicas

Nivel contaminación \ Condiciones meteorológicas	Lluvia	Nieve	Niebla	Despejado
Nivel alto	0.7	0.5	0.4	0.3
Nivel bajo	0.25	0.5	0.6	0.7

Todos las probabilidades anteriores las introducimos en el modelo de GeNIe.

2.3. Modelización de preferencias

Ahora modelizamos nuestras preferencias con el software Web-HIPRE.

En primer lugar, definimos nuestro modelo jerárquico de objetivos. Nuestro objetivo principal será llegar al trabajo, que a su vez, tiene tres subobjetivos: el económico, el confort y los sociales. En el primero se encuentra el coste y el tiempo de llegada; en el segundo, los transbordos, el tiempo de espera, las personas del habitáculo y el tipo de transporte (que a su vez puede ser terrestre o subterráneo); y los últimos, formado por los ruidos y la contaminación. La Figura 4 muestra la jerarquía completa (junto con las alternativas) una vez introducida en Web-HIPRE.

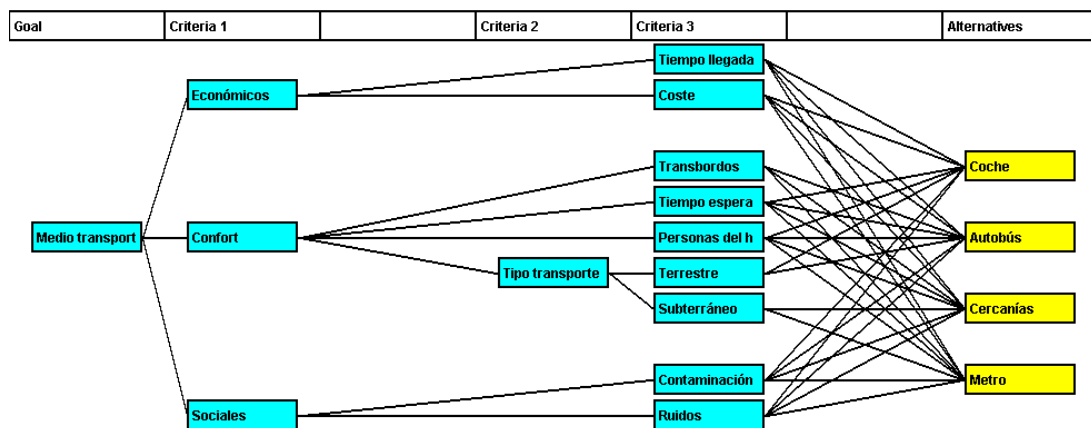


Figura 4: Modelo jerárquico de objetivos

Para cada uno de nuestros objetivos terminales (las hojas del árbol), definimos una escala, y los valores máximos y mínimos que pueden tomar cada uno de ellos(Figura 5).

En el tiempo de llegada, el coste, el número de transbordos, el tiempo de espera se han considerado los valores máximos y mínimos haciendo una estimación, teniendo una

	Tiempo llegada	Coste	Tiempo espera	Personas del ha	Contaminación	Ruidos	Transbordos
Min Rating	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
Coche	30.0	1.5	0.0	1.0	5.7	70.0	0.0
Cercanías	55.0	2.5	15.0	150.0	1.86	80.0	2.0
Metro	50.0	2.0	10.0	120.0	0.75	75.0	1.0
Autobús	65.0	2.5	10.0	60.0	1.86	80.0	0.0
Max Rating	100.0	5.0	100.0	200.0	10.0	100.0	3.0
Unit	minutos	euros	minutos	personas	kg de CO2 diarios	dB	transbordos

Figura 5: Ratings de los objetivos terminales

referencia para cada alternativa.

En los casos de la contaminación y los ruidos, se han tenido que consultar distintas fuentes para establecer los límites inferior y superior, y dar un valor para cada alternativa. En el caso de la contaminación, los valores para cada alternativa se han calculado con la calculadora de CO2 de Terra <http://www.terra.org/calc/>. Notar que esta calculadora necesita la distancia recorrida (en kilómetros) y el número de veces que se realiza el trayecto. En nuestro caso son 30 kilómetros y una vez al día (sólo consideramos el trayecto de ida). Aplicando los parámetros para cada transporte y dividiendo entre 365 (calcula los kilogramos de CO2 emitidos en un año), se obtienen los valores de la Figura 5.

En el caso del ruido, marcamos el límite máximo como 100, por debajo del umbral del dolor situado en 120 dB, según la OMS. Para establecer medidas para cada una de las alternativas, consultamos distintas páginas web y blogs, que nos llevan a los datos de la Figura 5.

Ya estamos en disposición de introducir las funciones de valor para cada uno de los objetivos.

Comenzamos con el coste. Usando el método Valuefn, creamos una función de valor de tipo exponencial donde se le da al coche como valor 0.979, al metro 0.961 y, al Cercanías y al autobús, 0.930. Es decir, consideramos diferencias mínimas entre los precios de los medios de transporte (Figura 6).

En el caso del tiempo de llegada, el número de transbordos, el tiempo de espera, personas del habitáculo, la contaminación y el ruido calculamos la función de valor empleando el mismo método, Valuefn. Las funciones de valor de cada uno de estos objetivos se pueden ver en la Figura 7.

Para el caso de los tipos de transporte, terrestre y subterráneo, empleamos el método Direct para asignar la función de valor. Notar que todas las alternativas no son medios de transporte subterráneo y terrestre simultáneamente, sino que sólo pueden ser de

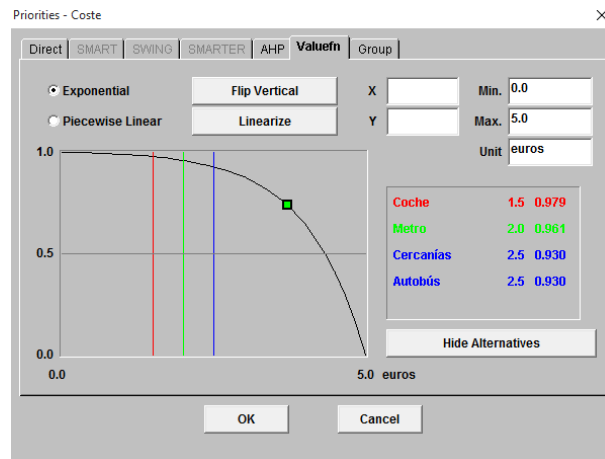


Figura 6: Función de valor del coste

un solo tipo. Por ello, sólo unimos el tipo de transporte con sus alternativas correctas (coche y autobús para terrestre, y Cercanías y metro para subterráneo). De esta forma, asignamos pesos a los medios de transporte correctos. La Figura 8 muestra los pesos para terrestre y subterráneo.

Para la asignación de prioridades en el caso del tipo de transporte, usamos el modo SWING, donde hay que asignar 100 puntos a la opción más prioritaria (terrestre en nuestro) y dar otra puntuación (menor que 100) a las otras opciones (sólo nos queda la opción de subterráneo a la que damos 40 puntos). Ver Figura 9.

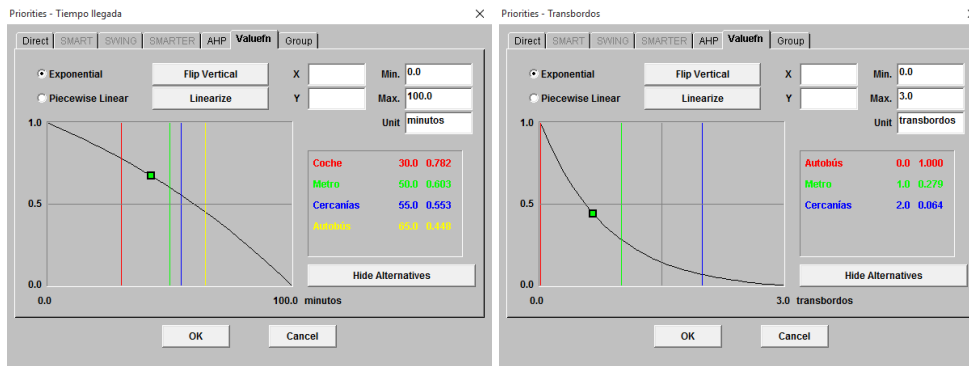
De nuevo, usamos el método SWING para ajustar los pesos del objetivo Económicos y Confort. En el caso de Económicos asignamos 100 puntos a la opción Tiempo llegada y 40 puntos al coste. Para Confort, asignamos 100 puntos a Tipo transporte, 80 al tiempo de espera, 70 al número de transbordos y 40 al número de personas del habitáculo. Ver Figura 10.

Para el objetivo Sociales, asignamos los pesos con el método Direct. Damos 0.8 a la contaminación y 0.2 a los ruidos (Figura 11).

Por último, sólo nos queda asignar pesos al objetivo de elegir medio de transporte. Usamos, de nuevo, el método SWING. Damos 100 puntos al objetivos Económicos, 60 a Confort y 45 a Sociales.

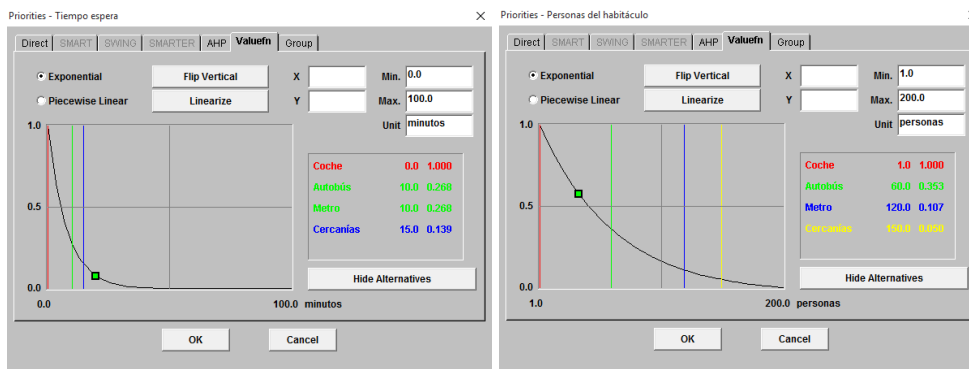
Ya tenemos asignadas las prioridades a todos los objetivos. Ahora debemos analizar nuestras preferencias. La Figura 13 muestra los resultados según los objetivos primarios. Observamos que nuestra opción preferida es el coche, seguido del metro y el autobús. En última opción se encuentra Cercanías. De acuerdo a lo establecido anteriormente, los objetivos económicos pesan mucho para la elección de la alternativa.

Si, por último, consideramos los resultados según los objetivos terminales (Figura 14)



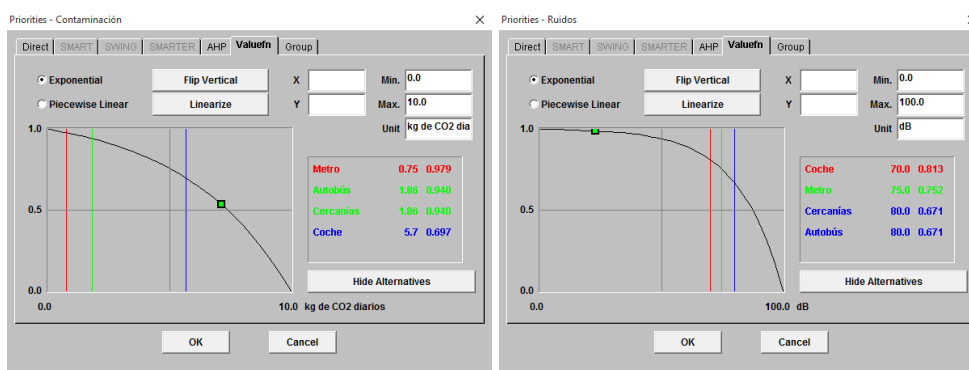
(a) Función de valor del tiempo de llegada

(b) Función de valor del número de transbordos



(c) Función de valor del tiempo de espera

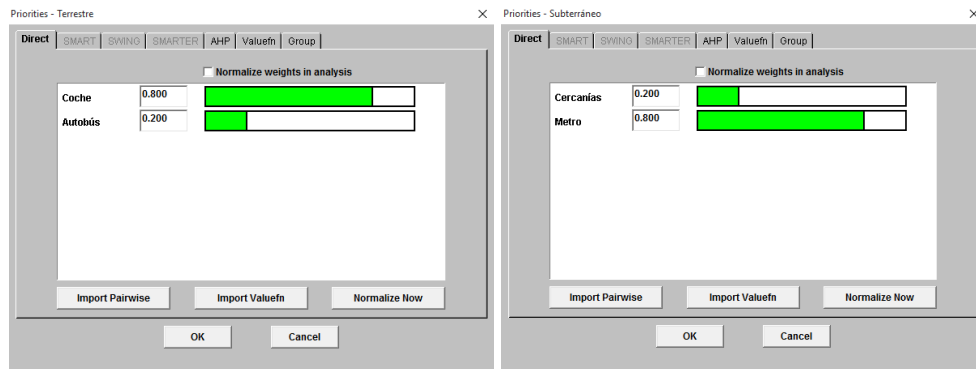
(d) Función de valor del número de personas del habitáculo



(e) Función de valor de la contaminación

(f) Función de valor del ruido

Figura 7: Funciones de valor para tiempo de llegada, el número de transbordos, el tiempo de espera, personas del habitáculo, la contaminación y el ruido



(a) Función de valor de terrestre

(b) Función de valor de subterráneo

Figura 8: Pesos para terrestre y subterráneo

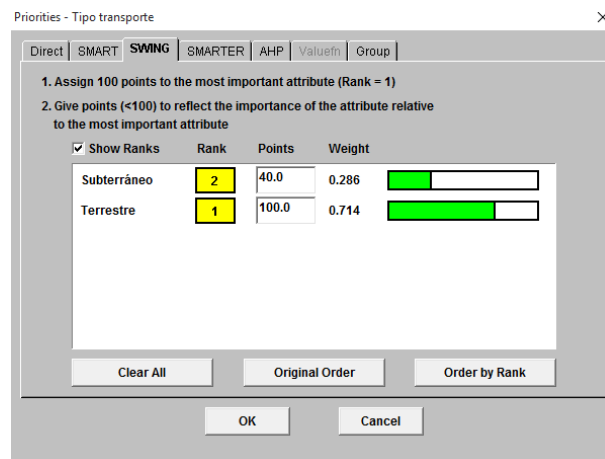
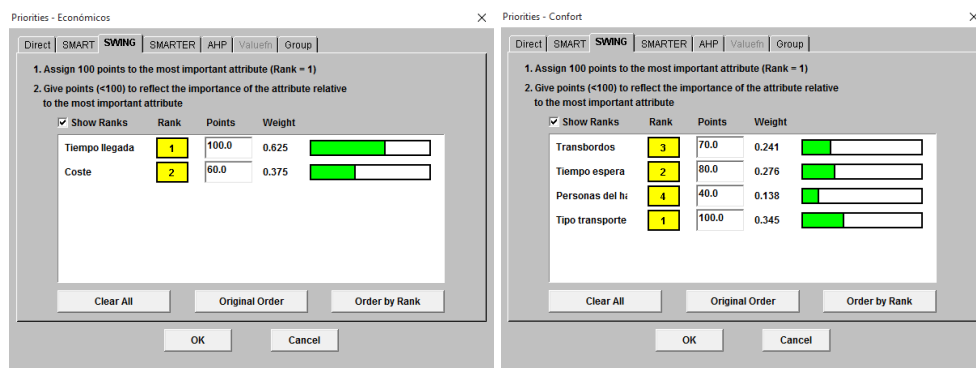


Figura 9: Pesos para tipo de transporte



(a) Asignación de pesos para Económicos

(b) Asignación de pesos para Confort

Figura 10: Pesos para Económicos y Confort

Priorities - Sociales

Direct SMART SWING SMARTER AHP Valuefn Group

Contaminación	0.800	<div style="width: 80%; background-color: green;"></div>
Ruidos	0.200	<div style="width: 20%; background-color: green;"></div>

Import Pairwise Import Valuefn Normalize Now

OK Cancel

Figura 11: Pesos para Sociales

Priorities - Medio transporte

Direct SMART **SWING** SMARTER AHP Valuefn Group

1. Assign 100 points to the most important attribute (Rank = 1)
2. Give points (<100) to reflect the importance of the attribute relative to the most important attribute

☒ Show Ranks

	Rank	Points	Weight	
Económicos	1	100.0	0.488	<div style="width: 48.8%; background-color: green;"></div>
Confort	2	60.0	0.293	<div style="width: 29.3%; background-color: green;"></div>
Sociales	3	45.0	0.220	<div style="width: 22.0%; background-color: green;"></div>

Clear All Original Order Order by Rank

OK Cancel

Figura 12: Asignación de pesos para Medio de transporte

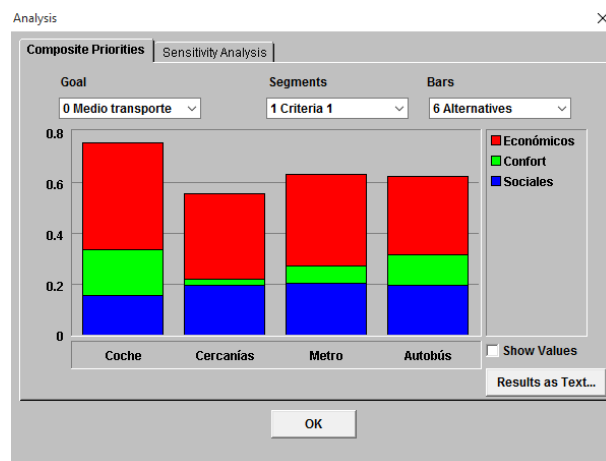


Figura 13: Preferencias según objetivos Económicos, Confort y Sociales

observamos que lo que más peso tiene dentro de nuestras preferencias es el tiempo de llegada, seguido del coste, y en menor medida, la contaminación.

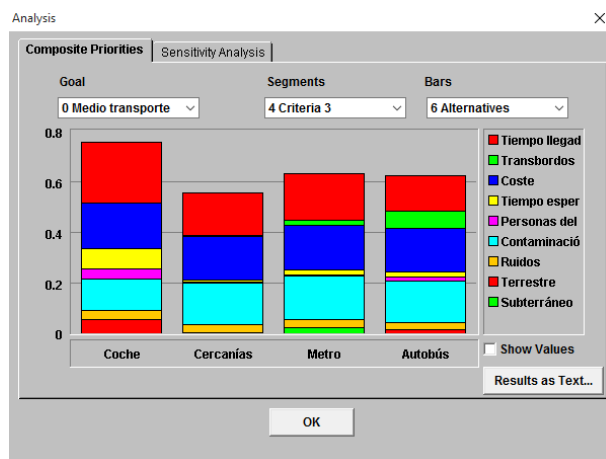


Figura 14: Preferencias según objetivos terminales

2.4. Optimización

Antes de poder optimizar, necesitamos cohesionar nuestros dos modelos: el diagrama de influencia y el modelo jerárquico de objetivos (Figura 15).

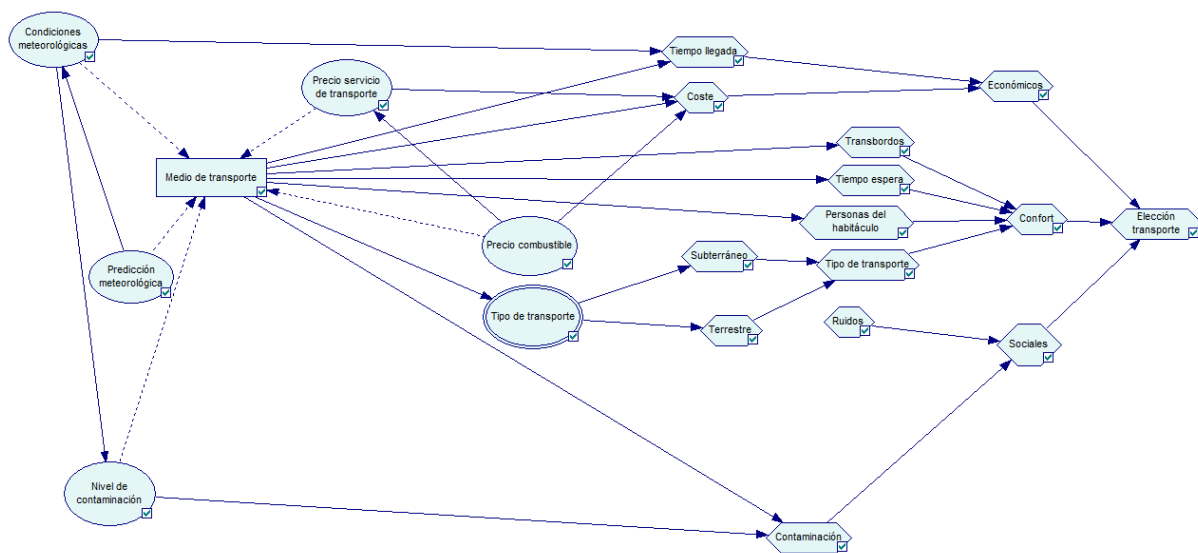


Figura 15: Modelo completo

Observamos la inclusión de un nodo determinístico llamado Tipo de transporte para distinguir entre los medios de transporte terrestres y subterráneos. En la Figura 16 se

muestran los distintos valores de este nodo.

Medio de trans...	Eleccion_Coche	Eleccion_Metro	Eleccion_Cercanias	Eleccion_Autobus
Terrestre	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Subterráneo	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>

Figura 16: Valores del nodo determinístico Tipo de transporte

Ya podemos introducir los valores en los nodos de valor obtenidos con Web-HIPRE.

Resolvemos el modelo con GeNIe, obteniendo los resultados que se muestran en la Figura 17.

Condiciones meteorol...	Condicion_Lluvia							
Nivel de contaminación	Contaminacion_Baja				Contaminacion_Alta			
Precio combustible	Precio_Combustible_Alto	Precio_Combustible_Bajo	Precio_Combustible_Alto	Precio_Combustible_Bajo	Precio_Combustible_Alto	Precio_Combustible_Bajo	Precio_Combustible_Alto	Precio_Combustible_Bajo
Precio servicio de tra...	Precio_Transporte_Alto	Precio_Transporte_Bajo	Precio_Transporte_Alto	Precio_Transporte_Bajo	Precio_Transporte_Alto	Precio_Transporte_Bajo	Precio_Transporte_Alto	Precio_Transporte_Bajo
Eleccion_Coche	1.6200078	1.5720828	1.6679328	1.6200078	1.1400078	1.0920828	1.1879328	1.1400078
Eleccion_Metro	1.6377842	1.6857092	1.5898592	1.6218092	1.7177842	1.7657092	1.6698592	1.7018092
Eleccion_Cercanias	1.461556	1.477531	1.381681	1.429606	1.381556	1.397531	1.301681	1.349606
Eleccion_Autobus	1.6434328	1.6434328	1.5316078	1.5955078	1.7234328	1.7234328	1.6116078	1.6755078

(a) Solución para condiciones meteorológicas de lluvia

Condiciones meteorol...	Condicion_Nieve							
Nivel de contaminación	Contaminacion_Baja				Contaminacion_Alta			
Precio combustible	Precio_Combustible_Alto	Precio_Combustible_Bajo	Precio_Combustible_Alto	Precio_Combustible_Bajo	Precio_Combustible_Alto	Precio_Combustible_Bajo	Precio_Combustible_Alto	Precio_Combustible_Bajo
Precio servicio de tra...	Precio_Transporte_Alto	Precio_Transporte_Bajo	Precio_Transporte_Alto	Precio_Transporte_Bajo	Precio_Transporte_Alto	Precio_Transporte_Bajo	Precio_Transporte_Alto	Precio_Transporte_Bajo
Eleccion_Coche	1.5933828	1.5454578	1.6413078	1.5933828	1.1133828	1.0654578	1.1613078	1.1133828
Eleccion_Metro	1.6377842	1.6857092	1.5898592	1.6218092	1.7177842	1.7657092	1.6698592	1.7018092
Eleccion_Cercanias	1.6346185	1.6505935	1.5547435	1.6026685	1.5546185	1.5705935	1.4747435	1.5226685
Eleccion_Autobus	1.5369328	1.5369328	1.4251078	1.4890078	1.6169328	1.6169328	1.5051078	1.5690078

(b) Solución para condiciones meteorológicas de nieve

Condiciones meteorol...	Condicion_Niebla							
Nivel de contaminación	Contaminacion_Baja				Contaminacion_Alta			
Precio combustible	Precio_Combustible_Alto	Precio_Combustible_Bajo	Precio_Combustible_Alto	Precio_Combustible_Bajo	Precio_Combustible_Alto	Precio_Combustible_Bajo	Precio_Combustible_Alto	Precio_Combustible_Bajo
Precio servicio de tra...	Precio_Transporte_Alto	Precio_Transporte_Bajo	Precio_Transporte_Alto	Precio_Transporte_Bajo	Precio_Transporte_Alto	Precio_Transporte_Bajo	Precio_Transporte_Alto	Precio_Transporte_Bajo
Eleccion_Coche	1.6200078	1.5720828	1.6679328	1.6200078	1.1400078	1.0920828	1.1879328	1.1400078
Eleccion_Metro	1.5845342	1.6324592	1.5366092	1.5685592	1.6645342	1.7124592	1.6166092	1.6485592
Eleccion_Cercanias	1.594681	1.610656	1.514806	1.562731	1.514681	1.530656	1.434806	1.482731
Eleccion_Autobus	1.5901828	1.5901828	1.4783578	1.5422578	1.6701828	1.6701828	1.5583578	1.6222578

(c) Solución para condiciones meteorológicas de niebla

Condiciones meteorol...	Condicion_Despejado							
Nivel de contaminación	Contaminacion_Baja				Contaminacion_Alta			
Precio combustible	Precio_Combustible_Alto	Precio_Combustible_Bajo	Precio_Combustible_Alto	Precio_Combustible_Bajo	Precio_Combustible_Alto	Precio_Combustible_Bajo	Precio_Combustible_Alto	Precio_Combustible_Bajo
Precio servicio de tra...	Precio_Transporte_Alto	Precio_Transporte_Bajo	Precio_Transporte_Alto	Precio_Transporte_Bajo	Precio_Transporte_Alto	Precio_Transporte_Bajo	Precio_Transporte_Alto	Precio_Transporte_Bajo
Eleccion_Coche	1.8596328	1.8117078	1.9075578	1.8596328	1.3796328	1.3317078	1.4275578	1.3796328
Eleccion_Metro	1.5579092	1.6058342	1.5099842	1.5419342	1.6379092	1.6858342	1.5899842	1.6219342
Eleccion_Cercanias	1.5547435	1.5707185	1.4748685	1.5227935	1.4747435	1.4907185	1.3948685	1.4427935
Eleccion_Autobus	1.5103078	1.5103078	1.3984828	1.4623828	1.5903078	1.5903078	1.4784828	1.5423828

(d) Solución para condiciones meteorológicas con el cielo despejado

Figura 17: Solución del modelo

2.5. Análisis del modelo

Puesto que la solución tiene muchas incertidumbres representamos, en forma de árbol, para cada condición meteorológica el medio de transporte que da la solución. Ver Figuras 18 a 21. En cada una de las figuras se indica en azul las condiciones meteorológicas, en amarillo el nivel de contaminación, en verde el precio del combustible y, en rojo el

precio del transporte.

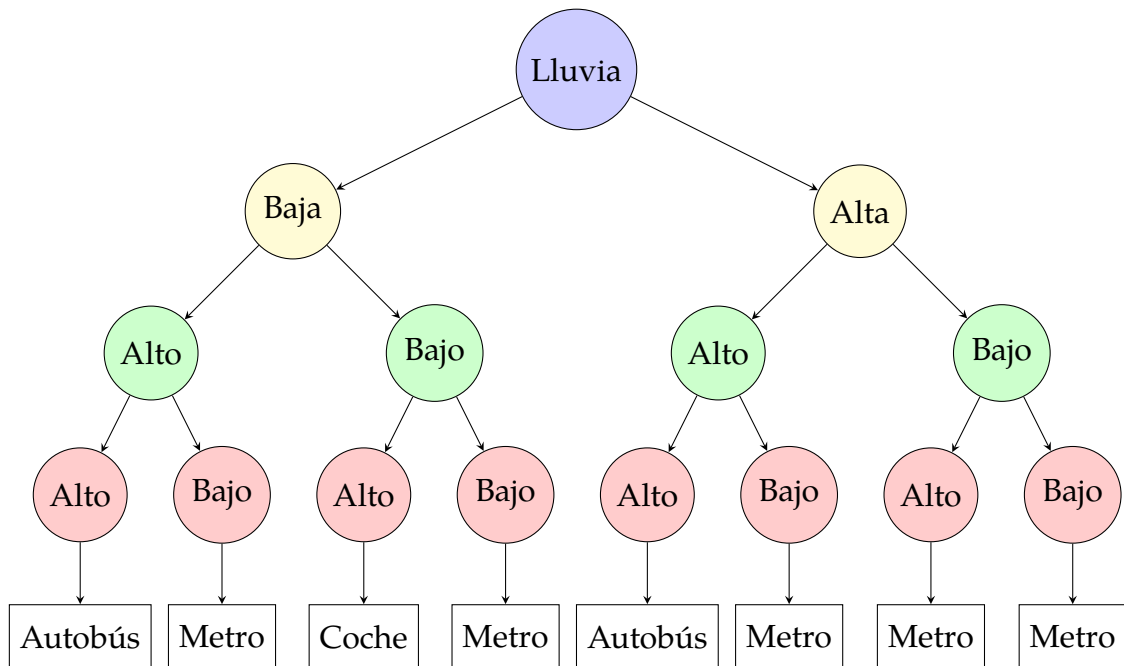


Figura 18: Árbol con la solución para condiciones de lluvia

En el caso de condiciones de lluvia, debemos utilizar distintos medios de transporte según el nivel de contaminación, el precio del combustible y de los transportes públicos. Así, en caso de contaminación baja, precio del combustible alto y precio del transporte público alto debemos escoger el autobús. Si tenemos el precio del transporte público, entonces el metro. Si hay contaminación baja, precio del combustible alto y el precio del transporte público es alto, entonces cogeremos el coche. Si el precio del transporte es bajo, debemos elegir el metro. Si la contaminación es alta, el precio del combustible alto, el precio del transporte alto, entonces el autobús cogeremos. Si el precio del transporte es bajo cogeremos el metro. Si el precio del combustible es bajo, entonces escogeremos el metro, independientemente del precio del transporte público.

En el caso de condiciones de nieve, elegiremos siempre el metro, salvo cuando se de que el nivel de contaminación sea baja, el precio del combustible sea bajo y el precio del transporte público sea alto, que elegiremos el coche.

En caso de niebla, si tenemos contaminación baja, escogeremos el coche, salvo cuando el precio del combustible sea alto y el precio del transporte público bajo. En caso de que haya contaminación alta, elegiremos siempre el metro, salvo cuando el precio del combustible sea alto y el precio del transporte público sea alto que escogeremos el autobús.

En caso de que el cielo esté despaado, escogeremos el coche si hay contaminación baja

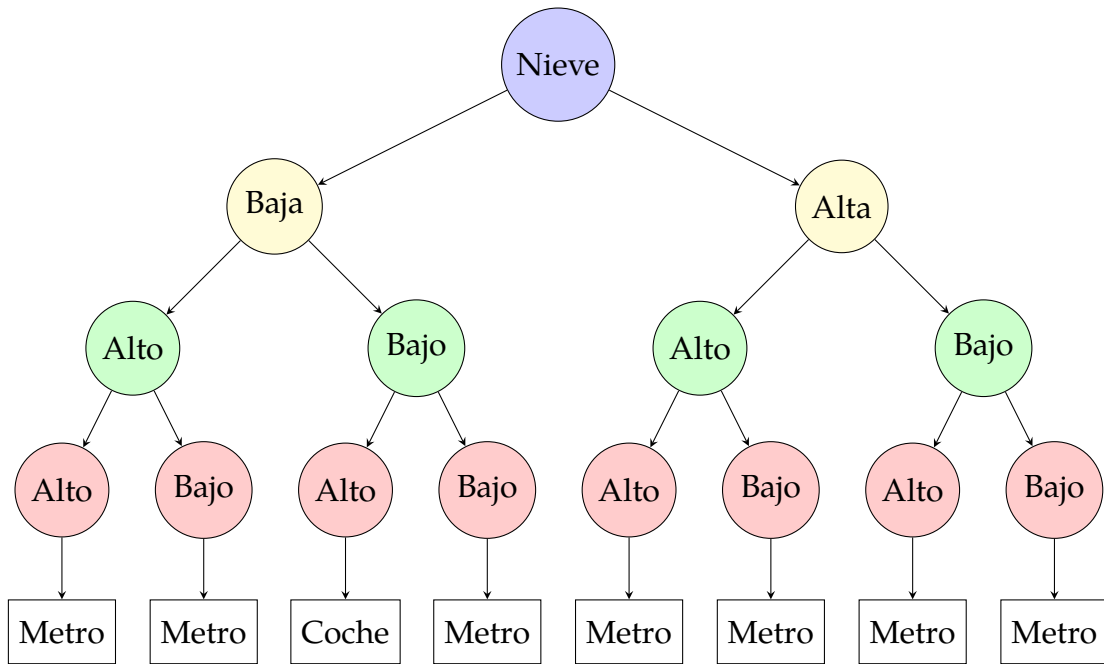


Figura 19: Árbol con la solución para condiciones de nieve

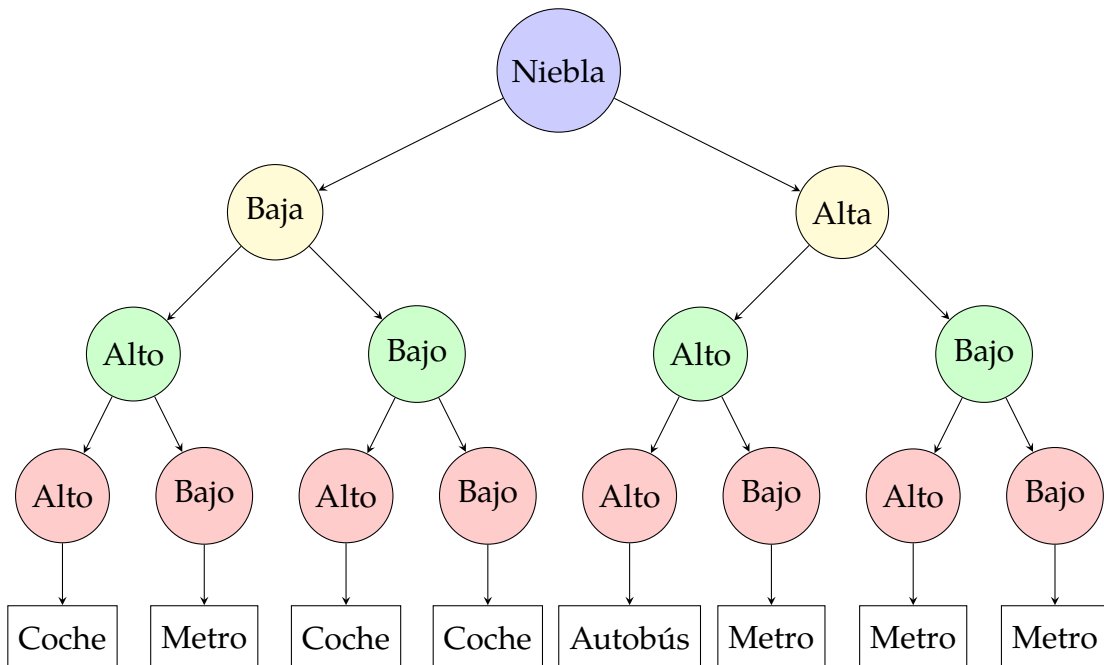


Figura 20: Árbol con la solución para condiciones de niebla

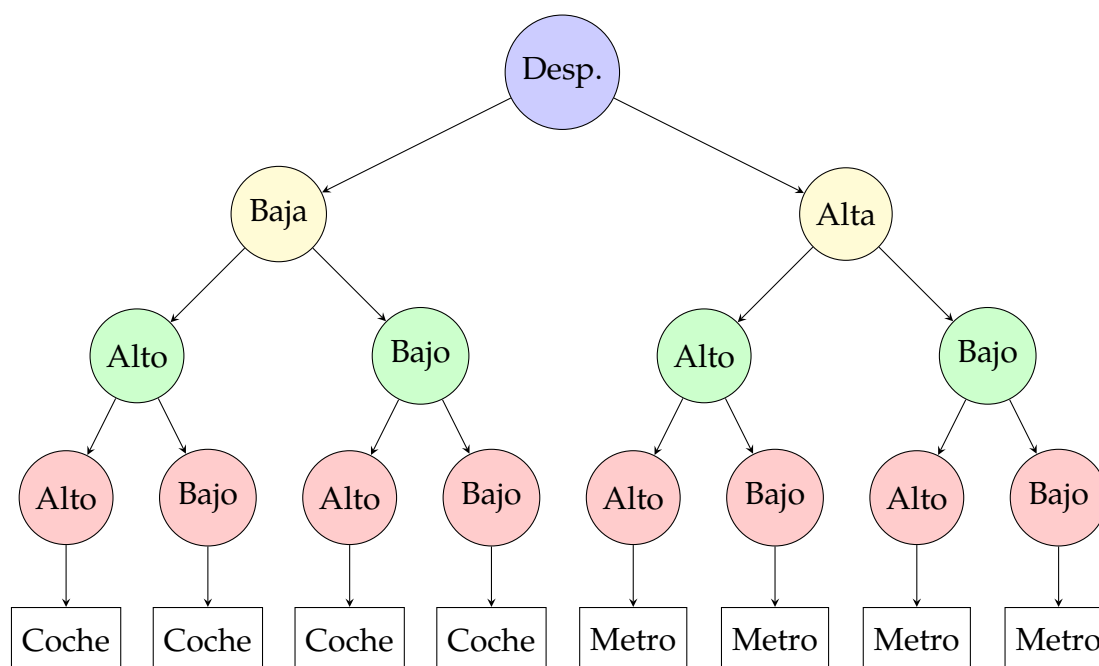


Figura 21: Árbol con la solución para condiciones de cielo despejado

y el metro si la contaminación es alta.

2.6. Análisis de sensibilidad

A continuación, realizamos un análisis de sensibilidad con Web-HIPRE. A tenor de nuestras elección de preferencias, los modos de asignación más imprecisos son Direct y SWING. Debemos estudiar como varían nuestras preferencias en los nodos cuyos método de asignación de preferencias sea alguno de los dos anteriores. Por brevedad, solo comentaremos cómo cambia la solución del nodo Medio Transporte si cambian las preferencias de los objetivos Económicos, Confort y Sociales.

3. Conclusiones