

Capítulo 3

EL IDS: UN NUEVO SISTEMA INTEGRADO DE TOMA DE DECISIONES

3.1. INTRODUCCIÓN

La anterior revisión del estado del conocimiento con relación a la cuestión de la toma de decisión ha puesto en evidencia la necesidad de avanzar en el enfoque integrador, lo cual lleva a plantear la conveniencia de diseñar un nuevo instrumento para abordar el problema.

Con este fin, se propondrá un nuevo instrumento de toma de decisiones basado en el concepto del valor como criterio básico de decisión que incorpore de forma natural el elemento riesgo. Dicho instrumento constará de un proceso de toma de decisión en el que se engazarán estos conceptos de valor y riesgo en un entramado de herramientas y métodos que permitan la resolución de aspectos parciales orientados a la resolución global del problema. Al corpus generado se le denominará “sistema”, en referencia a la acepción de dicho término como conjunto de elementos interrelacionados y orientados a un mismo fin.

En referencia a los conceptos fundamentales de valor y riesgo anteriormente comentados y recogiendo esta idea de “sistema” anteriormente comentada, se denominará al nuevo instrumento con las siglas IDS, correspondientes a la expresión “Value and Risk based **I**ntegrated **D**ecision-making **S**ystem” (Sistema integrado de toma de decisiones basado en los conceptos de valor y riesgo).

Para sentar las bases teóricas del nuevo instrumento propuesto se estructurará el contenido del capítulo en coherencia con los tres elementos principales de la propuesta, recogidos en la figura 3.1:

- Un nuevo concepto valor mediante un modelo sistémico, al que se le denominará Modelo Integrado de Valor (MIV), con una formulación coherente.
- Un nuevo concepto y modo de evaluación del riesgo integrada con el elemento anterior y que introduzca los riesgos puros y especulativos de un modo compacto y unitario.
- Un nuevo proceso de toma de decisión que integre los elementos anteriores, al que se denominará ACE en referencia a sus fases principales; Análisis, Creatividad y Evaluación

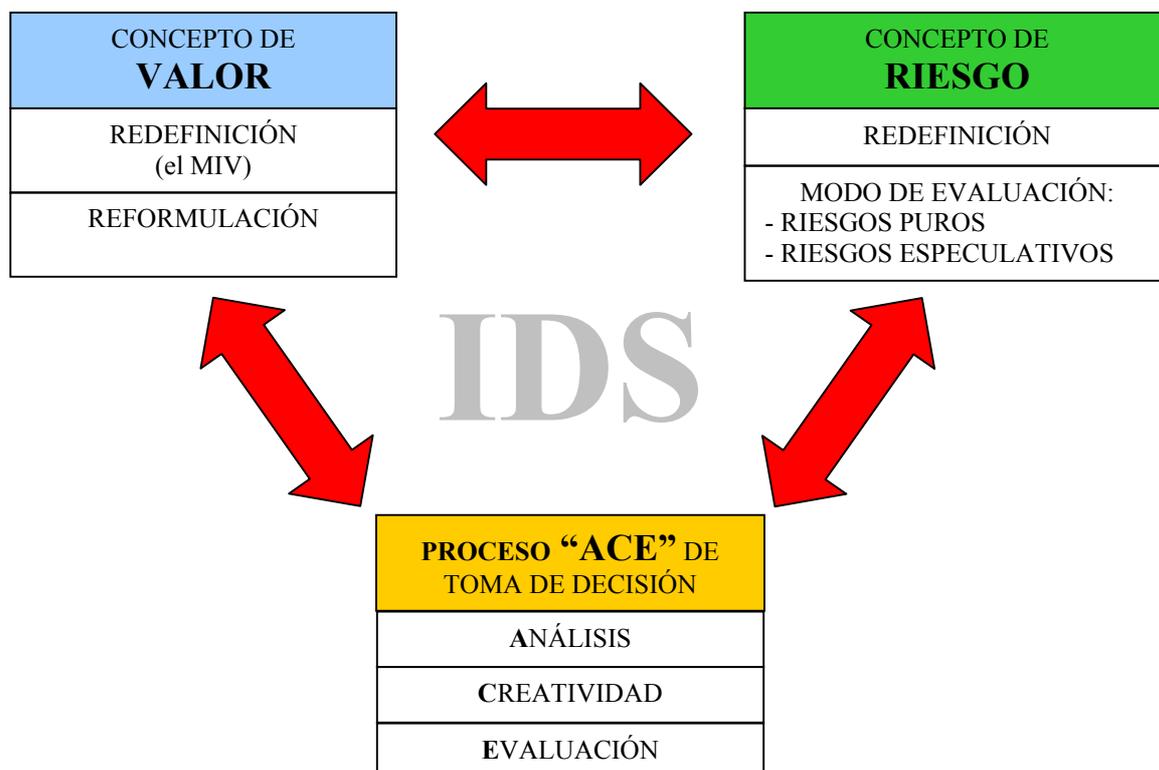


Figura 3.1. Esquema de desarrollo del capítulo 3

Según se observa en la figura 3.1, los tres elementos recogidos (la toma de decisión, el valor y el riesgo) corresponden a los tres ejes de desarrollo del estado del conocimiento (véase la figura 2.1 del capítulo 2), en coherencia con el esquema de desarrollo de la tesis establecido en la figura 1.2 del capítulo 1.

3.2. PROPUESTA DE REDEFINICIÓN DEL CONCEPTO DE VALOR

3.2.1. El MIV: La nueva definición sistémica del concepto de valor y sus elementos

La redefinición del concepto de valor constituye uno de los puntos centrales de la propuesta teórica de esta tesis. Se pretende diseñar una descripción rigurosa con un grado de generalización suficiente para englobar las aportaciones anteriores, de manera que sienta las bases para una posterior formulación coherente con ella. En este contexto, se propone la siguiente definición del concepto de valor:

“el valor de una alternativa es el grado de satisfacción que produce, medido como la respuesta a los requerimientos de la realidad analizada en un cierto marco de referencia”

Dicha definición se corresponde al modelo sistémico del valor propuesto en la figura 3.2. y al que en adelante se denominará “Modelo Integrado del Valor” (MIV).

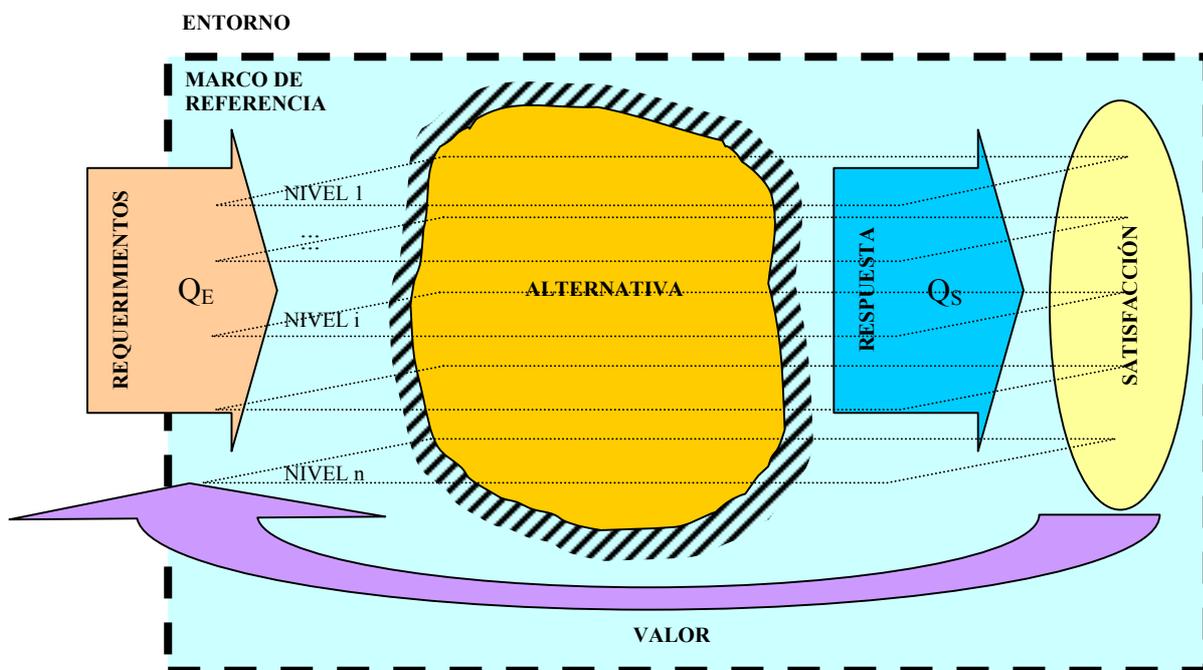


Figura 3.2. Elementos principales de la definición sistémica del valor

Como puede observarse en la definición anterior, representada en la figura 3.2, el concepto propuesto es un arquetipo sistémico con los siguientes elementos:

- | | |
|-----------------------------|--|
| ▪ Las entradas del sistema: | <i>Los requerimientos</i> |
| ▪ El núcleo del sistema: | <i>La alternativa de toma de decisión</i> |
| ▪ La salida del sistema: | <i>La respuesta a los requerimientos</i> |
| ▪ La medida del sistema: | <i>El concepto de satisfacción</i> |
| | <i>Los planos de estudio</i> |
| ▪ El límite del sistema: | <i>El marco de referencia de la decisión</i> |

Desde un punto de vista más general, puede representarse el concepto según se muestra en la figura 3.3, donde se visualiza la misma idea considerando todas las alternativas generadas en las diversas tomas de decisión a lo largo del proyecto. Por tanto, el modelo sistémico presentado en la figura 3.2 sería un caso particular de esta representación más general, de modo que consideraría el valor de una sola alternativa (es decir, uno de los planos verticales considerados) respecto a una cierta decisión en un punto determinado del marco de referencia tomado (por ejemplo, el ciclo de vida en el caso de los proyectos constructivos), o en una porción o rebanada del mismo (en una cierta fase del ciclo de vida). Esta idea se visualiza en la figura 3.3, donde queda limitada el área correspondiente a un cierto plano vertical y a una determinada rebanada o porción del ciclo de vida o marco de referencia. Por tanto, así como la figura 3.2. y la definición propuesta anteriormente corresponden al valor de una cierta alternativa en una determinada toma de decisión, la figura 3.3, más general, se aplica al valor de toda la realidad que constituye el marco de referencia, es decir, el conjunto del proyecto (en caso de la gestión de proyectos) o el total de la organización (en el caso de la gestión empresarial o, en general, de organizaciones).

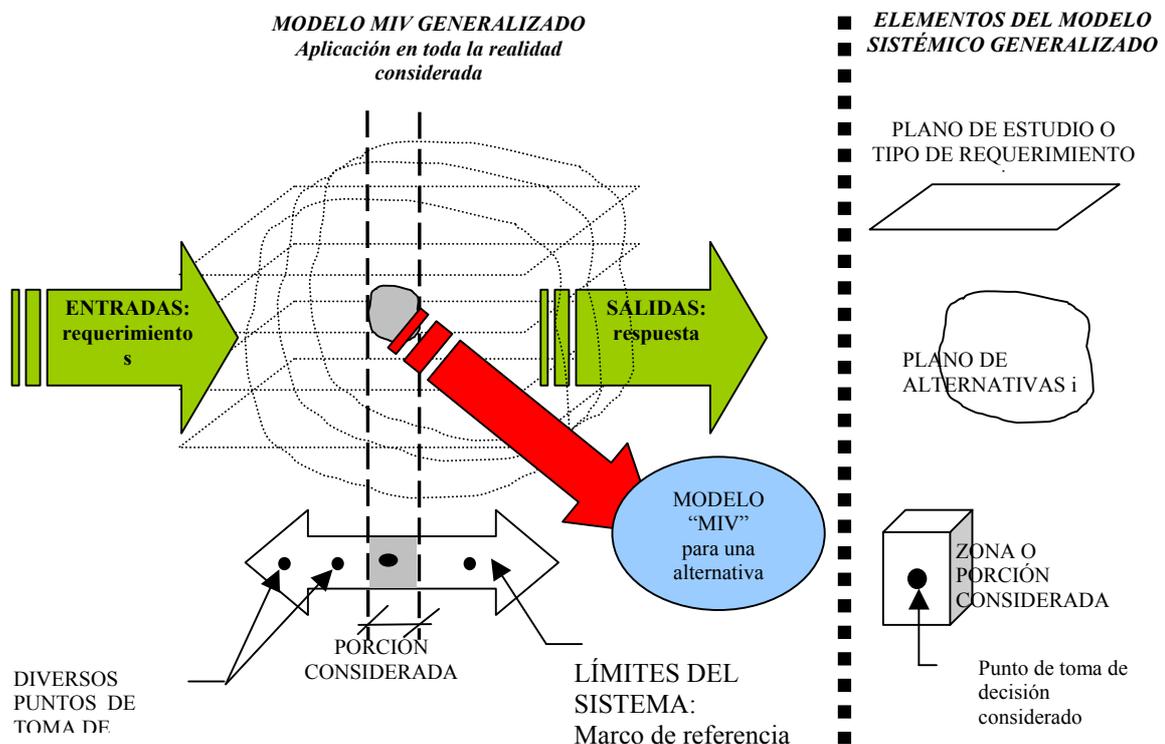


Figura 3.3. Elementos del modelo MIV generalizado a toda la realidad considerada

Asimismo, es interesante observar que la figura anterior es una generalización de diversos aspectos considerados en torno a la toma de decisión. Por ejemplo, al moverse en uno de los planos horizontales puede analizarse de forma separativa un aspecto determinado de la realidad considerada (proyecto, producto, organización), tal como el plano económico, temporal, social o medioambiental. Obviamente las entradas del sistema (los requerimientos) se sitúan en todos los planos considerados, de manera que, según se indica en la figura 3.3, estos corresponden a los diversos tipos de requerimientos.

Desde el punto de vista teórico, esta nueva definición supone, en primer lugar, una integración de los diversos aspectos identificados en la literatura sobre el concepto de valor, según lo descrito en el capítulo 2 y el apéndice C. Entre ellos destaca:

- el carácter multiatributo del concepto, representado mediante los diversos niveles o planos de evaluación. De este modo, por ejemplo, podrían considerarse las diversas alternativas en un plano económico, temporal, social, medioambiental, etc.
- la contextualización y el carácter temporal del valor, es decir, dependerá de un cierto marco de referencia, como por ejemplo el ciclo de vida en los proyectos constructivos. Además, contempla la posibilidad de considerar el valor de una alternativa en cualquier porción, zona o “rebanada” del marco de referencia considerado, por ejemplo, en un cierto periodo o momento del ciclo de vida de un producto o proyecto.
- el carácter subjetivo del valor, articulado a través del concepto de satisfacción de los requerimientos planteados

A continuación se llevará a cabo una definición análisis pormenorizado de los diversos elementos de la definición propuesta, según la figura 3.2. y su generalización en la figura 3.3. Dichos elementos se dividen a su vez en otros elementos, por lo que pueden calificarse de “subsistemas” del modelo sistémico MIV.

3.2.2. Las entradas del sistema: los requerimientos (o requisitos)

Las entradas del sistema propuesto se definen con el término “requerimiento” (o “requisito”¹). Dicho concepto se plantea de forma abierta, de manera que engloba todos los términos utilizados en la literatura para hacer referencia a este concepto de “entrada” de la toma de decisión. Entre ellos destacan el de “objetivo” (Keeney & Raiffa, 1976), “necesidad” (Tassinari, 1994), “meta” (Keeney & Raiffa, 1976) y “condicionante”. Además, en ocasiones se habla de “recursos” necesarios para llevar a cabo las alternativas consideradas y de las “prestaciones” buscadas al plantear la decisión. La adopción del término general de “requerimiento” responde precisamente al intento de evitar posibles ambigüedades relativas a diferencias de matiz entre diferentes personas en la distinción entre los términos anteriores, la cual puede ser en ocasiones un tanto confusa. Por otro lado, su discusión excedería el ámbito de esta tesis, situándose en un nivel más bien lingüístico o semántico. Por tanto, según se muestra en la figura 3.4, en esta tesis se define como “requerimiento” toda posible entrada de la toma de decisión, ya se entienda como objetivo, necesidad, meta, condicionante o con cualquier término similar, tanto en lo relativo a los recursos como a las prestaciones buscadas. Asimismo, esta definición general permite contemplar posibles diferencias de matiz entre los

¹ Otra alternativa para denominar a las entradas del sistema será utilizar el término “requisito”, el cual también expresa la esencia del concepto introducido. No obstante, se ha escogido la palabra “requerimiento” por considerar que tiene un uso mayor en el ámbito de la gestión (véase, por ejemplo Companys, 1994; Casals, 1997; AENOR, 2000b), aunque también existen autores que se inclinan por el término “requisito” (Heredia, 1995). Además, tiene una correspondencia con el término anglosajón “requierement”, muy utilizado en este ámbito. En cualquier caso, no se pretende entrar en controversias lingüísticas, así que el término a adoptar se deja abierto a posibles modificaciones futuras.

términos anteriormente citados. Así, por ejemplo, según se muestra en la figura 3.4 las metas y los condicionantes podrían considerarse como límites superiores de los objetivos y los condicionantes como niveles mínimos de las necesidades.

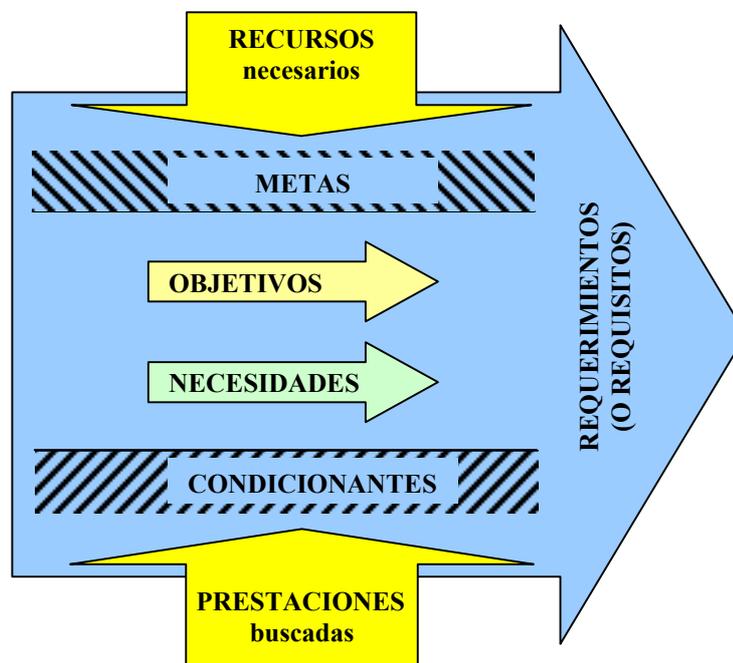


Figura 3.4. Esquema del concepto de “requerimiento” según se propone en esta tesis.

Como ejemplo de “requerimientos” podrían citarse los recogidos en la tabla 3.1. En ella puede observarse que la distinción entre los conceptos a los que se aludía anteriormente (figura 3.4) es en ocasiones sutil y subjetiva.

Requerimiento	Tipo de requerimiento (o plano de estudio donde se ubica)	Observaciones
Conseguir un coste de ejecución razonable	económico	Podría calificarse como un objetivo relativo a los recursos empleados (el capital)
Construcción antes del 1 de junio del año 2002.	temporal	Podría considerarse como una meta o como un condicionante relativo a los recursos empleados (el tiempo)
Respeto al entorno natural del proyecto	medioambiental	Podría considerarse un objetivo, aunque desde algún punto de vista también un condicionante. Hace referencia a las prestaciones, aunque también puede considerarse relativo a los recursos naturales.

Tabla 3.1. Ejemplos de requerimientos del sistema “MIV”, para el caso de un proyecto constructivo.

Atendiendo al contenido de la tabla cabe decir que, tanto el enunciado de los requerimientos planteados son relativos a un caso concreto de aplicación, y, por consiguiente, tienen un carácter opinable y personal, respecto a la persona o grupo de personas que los plantean. Esta característica es consecuencia de la asunción del enfoque integrador anteriormente comentado, según el cual en torno a un mismo

problema existirían muchos modos de plantearlos, dependiendo del caso considerado. De hecho, el sistema IDS y sus elementos no son sino esquemas de trabajo para ayudar al decisor o decisores a estructurar su estudio. Este comentario es extensible al conjunto de ejemplos introducidos para glosar las ideas de esta tesis.

3.2.3. El núcleo del sistema: La alternativa de toma de decisión

Por “alternativa” se entiende en este contexto una posible solución a una cuestión planteada, es decir, una opción generada en torno a una toma de decisión. Por tanto, el valor llevará implícito siempre la referencia a una cierta alternativa. El concepto de “alternativa” aquí definido engloba varios elementos, visualizados en la figura 3.5:

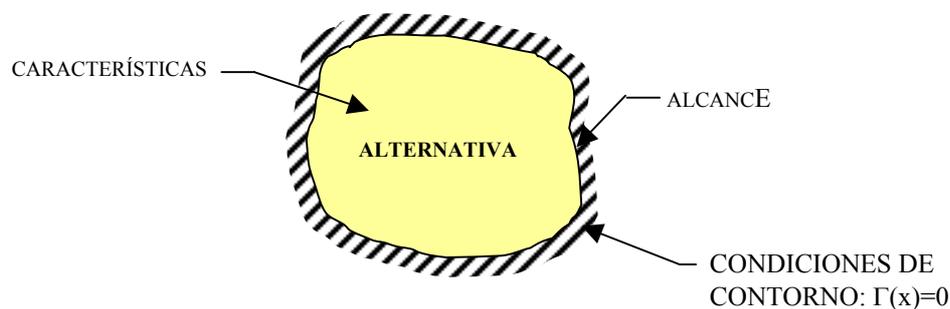


Figura 3.5. Modelización de los elementos de la alternativa de toma de decisión

El alcance de la alternativa

En primer lugar, la alternativa considerada tendrá un alcance, es decir, influirá en una parte de la satisfacción global en el conjunto del marco de referencia considerado (un proyecto, una organización, etc.). Este alcance será lo que marcará los límites de este subsistema. En el caso de un proyecto, por ejemplo, este alcance podrá ser definido mediante el conjunto de procesos y componentes que engloba la alternativa considerada y mediante los requerimientos en los que influye.

Las características de la alternativa

Por otro lado, la alternativa considerada poseerá ciertas características que definirán la respuesta a los requerimientos identificados. Dichas características serán de carácter físico o no, en función de la toma de decisión considerada.

Condiciones de contorno de la alternativa

Finalmente, cabe distinguir un último elemento intrínseco de toda alternativa; las condiciones de contorno que le impone el problema, las cuales se expresarán como incompatibilidades, imposiciones, etc. Estas condiciones de contorno se diferencian de los condicionantes considerados en el estudio de los requerimientos en que son propias o intrínsecas a la alternativa en cuestión, mientras que los condicionantes, tal como han sido definidos anteriormente, hacen referencia al conjunto de la realidad estudiada (proyecto, organización, etc.).

En la tabla 3.2 se adjunta un ejemplo de los elementos descritos anteriormente en el caso de una toma de decisión acerca del tipo de cimentación para un edificio industrial sobre suelo arcilloso. En este caso, la alternativa considerada es la cimentación por pilotaje excavado (otras alternativas podrían ser el pilotaje por penetración, la losa o los pozos de cimentación, los micropilotes, etc.). En la citada tabla se observa cómo se concretarían los elementos teóricos descritos anteriormente en un ejemplo concreto.

Elemento	Alternativa: Pilotaje excavado
Alcance (requerimientos a los que afecta)	Coste de cimentación Tiempo de ejecución de la cimentación Coste de mantenimiento del edificio
Características	- Materiales y geometría - Operaciones de ejecución ² - Trabajo por fuste y punta - Carga de hundimiento y capacidad portante (en función de los materiales y geometría)
Condiciones de contorno	Los relativos al tipo de pilotaje según la ejecución (por ejemplo, un determinado tipo de pilotaje no será viable en un cierto tipo de terreno ³)

Tabla 3.2. Ejemplo de los elementos del subsistema “alternativa” en un proyecto constructivo

3.2.4. La salida del sistema: la respuesta a los requerimientos

Con el término “respuesta” se pretende representar el conjunto de elementos relacionados con la salida del sistema propuesto, es decir, los parámetros de toda clase mediante los que se mide la respuesta dada a los requerimientos por la alternativa considerada. El término "respuesta" se ha escogido para visualizar que toda alternativa de toma de decisión ofrece una "respuesta" a los requerimientos a partir de los cuales ha sido suscitada. De hecho, el valor de dicha opción será la medición de la bondad de esa respuesta en términos de satisfacción. En la tabla 3.3. se recogen varios ejemplos de parámetros de respuesta en función de los requerimientos a los que hacen referencia en el análisis de la alternativa de cimentación de un edificio considerada en el ejemplo de la tabla 3.2.

Requerimiento	Parámetros de respuesta
Conseguir un coste de construcción razonable	Coste de ejecución de la cimentación
Acabar la construcción antes del 1 de junio del 2002	Tiempo de ejecución de la cimentación
Respeto al entorno urbano	Ruidos producidos por las operaciones de excavación

Tabla 3.3. Ejemplo de parámetros de respuesta

² Dependiendo del tipo de material a atravesar en el que se apoya y de la presencia o no de nivel freático se elegirá uno de los métodos constructivos que contempla la normativa NTE-CPI (CPI-4, CPI-5, ...CPI-8).

³ Por ejemplo, el tipo de pilote CPI-7 (barrenado sin entubación) tendría el condicionante de que el terreno donde se ejecute tiene que ser cohesivo.

3.2.5. La medida del sistema: el concepto de satisfacción

En el sistema propuesto el concepto de satisfacción posee un carácter nuclear, ya que se plantea como el modo de medir el valor. De hecho, según se desprende de la figura 3.2, el valor se define como el grado de satisfacción que produce la respuesta de la alternativa de toma de decisión considerada respecto a los requerimientos planteados. Es decir, una opción tendrá más valor para el decisor en cuanto más satisfacción le aporte. Según se ha explicado, la medida de esta satisfacción se hará a través de los parámetros de respuesta.

Este concepto de “satisfacción” se entenderá aquí tal como lo define Simon (1979), es decir, como el grado de bienestar que produce al decisor, entendiéndolo desde todos los puntos de vista, no sólo físicamente. Por tanto, en este contexto, la satisfacción guardará una estrecha relación con el “nivel de aspiración” del decisor, es decir, lo que este espera. Así, por ejemplo, un mismo resultado puede producir un grado de satisfacción distinto en diversas personas, dependiendo de su carácter, más o menos exigente, y de sus expectativas. En este sentido, atendiendo a los ejemplos de las tablas 3.1, 3.2 y 3.3, podrá considerarse que la medición numérica del parámetro de respuesta “coste de cimentación” (estimado, por ejemplo, en 50 millones de pesetas) produciría una cierta satisfacción del decisor en lo relativo al requerimiento al que hace referencia (en este caso, “conseguir un coste de construcción razonable”). Este grado de satisfacción dependerá del caso concreto, de modo que, según sus condicionantes financieros y su nivel de exigencia, este resultado producirá en el decisor un grado de satisfacción que no tiene porqué ser el mismo que el que produciría en otra persona ni incluso en el mismo sujeto en otras circunstancias.

3.2.6. Los límites del sistema: El marco de referencia

Este elemento constituye uno de los puntos clave en la definición del valor propuesta, dado que conlleva la contextualización de la toma de decisión considerada. Es decir, el valor no es ya un concepto aislado sino que tiene razón de ser en unos ciertos ejes de referencia, en los que adquiere significado. Este marco de referencia variará según la realidad analizada. Así, por ejemplo, en el caso de gestión de un proyecto el marco de referencia lo constituirá el ciclo de vida del mismo, de manera que al analizar una determinada decisión esta se situará en un cierto punto o etapa del ciclo de vida.

3.2.7. La estructura interna del sistema: Los planos de estudio

Lo que aquí se define como “planos de estudio” corresponde a los posibles tipos de requerimientos, como pueden ser los económicos, temporales, etc. Por otro lado, se deja al juicio del decisor los planos a considerar, de ahí que se indique en la figura 3.2 un número genérico “n” de planos de estudio, según la realidad analizada y la percepción del analista. Asimismo, en cada uno de los planos quedará reflejado el marco de referencia considerado. Así, por ejemplo, al analizar una decisión relativa a un proyecto constructivo, podrían considerarse diversos planos de estudio, como el

económico, el temporal, el medioambiental, etc. De este modo, en cada uno de ellos quedará reflejado el ciclo de vida del proyecto.

3.3. PROPUESTA DE REFORMULACIÓN DEL CONCEPTO DE VALOR

3.3.1. La modelización matemática del concepto de valor

En el apartado anterior se ha definido el concepto de valor mediante el modelo sistémico MIV. A continuación se procederá a articular una formulación matemática en orden a cuantificar dicho concepto, de manera que permita calcular un número “ v ” que represente el valor de forma integrada y coherente con los elementos introducidos en el modelo MIV. Para ello se definirá una función de valor de un requerimiento, y posteriormente se generalizará de forma que contemple un número genérico n de requerimientos.

La función del valor

El concepto de valor como grado de satisfacción se modeliza aquí mediante lo que se denomina “función del valor”, la cual se define de la siguiente manera:

Definición: Se define “*función del valor*” como aquella función v , que asocia un número $v(x)$ a cada parámetro de respuesta x en un espacio de evaluación y que representa la variación del grado de satisfacción del decisor o decisores en una escala entre -1 y 1 , representando estos valores el máximo grado de insatisfacción y satisfacción respectivamente en función de la variación del parámetro de respuesta.

La función del valor aquí propuesta tiene las siguientes características:

- i) Representa el concepto de “satisfacción”
- ii) Su rango de variación comprende valores positivos y negativos $(-1,1)$.
- iii) Puede ser creciente o decreciente
- iv) No es necesariamente inyectiva

La razón de que la relación descrita por $v(\cdot)$ no deba ser necesariamente inyectiva radica en su misma definición, dado que dos resultados diferentes de x pueden dar lugar al mismo grado de satisfacción.

El signo de la función del valor

Del concepto de satisfacción base de la definición de la función $v(x)$ se deduce que el signo de esta puede ser tanto negativo como positivo, en función de si el resultado de x produce satisfacción o insatisfacción. Es decir,

si $v_i(x) > 0 \rightarrow$ la alternativa considerada produce *satisfacción* respecto al requerimiento i , en una proporción mayor o menor dependiendo lógicamente de la magnitud de ese $v_i(x)$.

si $v_i(x) < 0 \rightarrow$ la alternativa considerada produce *insatisfacción* respecto al requerimiento i , en una proporción mayor o menor dependiendo lógicamente de la magnitud en valor absoluto de ese $v_i(x)$.

El sentido de la función del valor según los tipos de requerimientos

Al analizar los tipos de requerimientos podemos hablar de dos tipos, según varíe la satisfacción respecto al parámetro de respuesta x . Por tanto, el sentido de la función del valor dependerá del tipo de requerimiento considerado, es decir, podrá ser:

- i) *Creciente*: cuando un aumento del valor del parámetro x implique un *aumento de satisfacción*.
- ii) *Decreciente*: en el caso contrario
- iii) *Constante*: cuando una variación del parámetro implique indiferencia en lo relativo al grado de satisfacción.

Por ejemplo, en el caso de un requerimiento relacionado con el coste, la función de valor será decreciente, pues un aumento de coste produce, por lo general, una disminución de satisfacción. Sin embargo, a un requerimiento de tipo estético se le asociará una función de valor creciente, pues una mejora en este sentido supone un aumento de satisfacción.

La forma de la función del valor

La adopción de un rango de variación de $v(x)$ comprendido entre 1 y -1 , responde a que el grado de satisfacción puede considerarse acotado o de crecimiento asintótico, ya que a partir de cierto resultado el aumento de satisfacción o aportación de valor es cada vez menor, es decir,

$$\frac{dv(x)}{dx} \rightarrow 0 \quad (3.1.)$$

Esta idea puede glosarse mediante un sencillo ejemplo. Consideremos la satisfacción inducida por un requerimiento con su parámetro de respuesta como podría ser el coste de construcción. Es obvio que a partir de un coste máximo el nivel de insatisfacción aumentaría, pero de manera decreciente, ya que una vez el coste de la obra se ha disparado astronómicamente un potencial aumento de costes produce más bien indiferencia. En sentido positivo, el aumento de satisfacción que producirá una reducción de plazos cuando el plazo conseguido es ya muy bueno es cada vez menor, pues ya no se valora de la misma manera. Idéntica consideración puede aplicarse de forma paralela en un sentido positivo de satisfacción o en el negativo de insatisfacción (véase la figura 3.6). Ello implica que, en sentido estricto, las funciones de valor definidas adoptarán con frecuencia una forma de “S” análoga a las dos primeras de la figura 3.6. Sin embargo, su forma puede ser variada, según se muestra en la tercera función de la figura 3.6, donde puede observarse un caso en el que esta experimenta un cambio brusco. Sería la situación, por ejemplo, de un requerimiento relativo a la consecución de una determinado condicionante, como el cumplimiento de la normativa de la resistencia al fuego. En esta situación, muchos decisores buscarán que dicha resistencia cumpla el mínimo, de modo que los valores superiores de este parámetro no aportan un aumento de satisfacción, ya que no son necesarios en este caso.

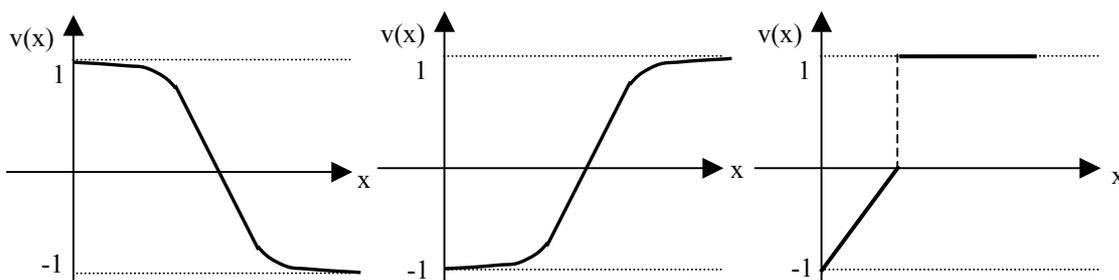


Figura 3.6. Formas más comunes adoptadas por la función de valor propuesta

Por motivos prácticos, cabe plantear la conveniencia de aproximar este tipo de funciones por una función definida linealmente por tramos, según se muestra en la figura 3.7. Según se observa en dicha figura, a partir de un cierto valor x_i del parámetro de respuesta, la satisfacción (y, por tanto, la función) puede considerarse constante. Dicha aproximación se articulará mediante la definición de un intervalo de variación, $[x^{\max}, x^{\min}]$, correspondiente a los valores que marquen la indiferencia, es decir, a partir de los cuales la variación relativa de la satisfacción pueda considerarse nula. Una posible opción para determinar este intervalo es tomar los valores de x entre los cuales se estime como razonable la variación, si bien dependiendo del caso será conveniente marcar límites específicos. Por ejemplo, si existe una limitación presupuestaria, el x_{\max} correspondiente al coste será, como es lógico, ese valor límite, y no el máximo coste razonablemente posible. Además, se determinará un valor x^* que corresponderá a aquel que define la diferencia entre la satisfacción y la insatisfacción.

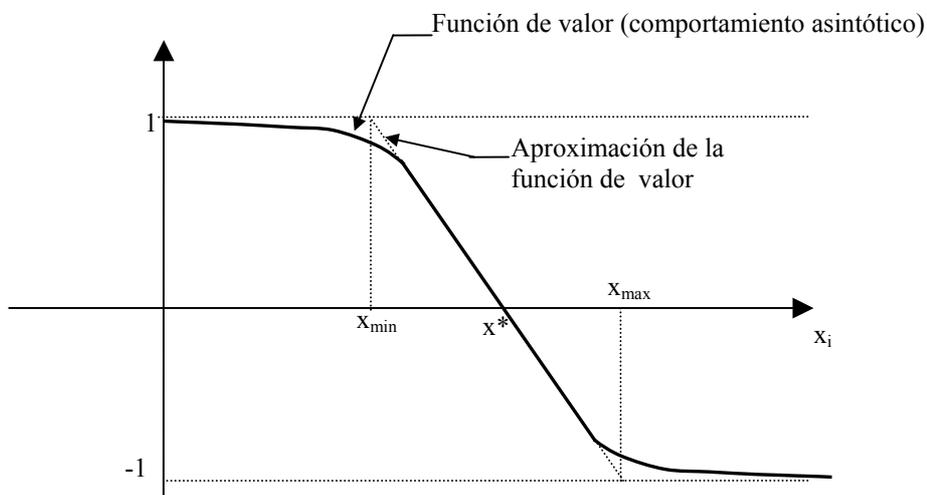


Figura 3.7. Forma real y aproximación de la función de valor

Por tanto, la distinción entre x^* y x^{\max} ó x^{\min} es flexible, de manera que podría identificarse con una u otra si se considerase, por ejemplo, que a partir de ese valor máximo posible aporta valor. En cualquier caso, es una apreciación que forma parte de la percepción subjetiva del concepto, y al igual que la forma de la función de valor, deberá ser definida *ad casum* por el decisor.

3.3.2. El valor como integración de requerimientos y parámetros de respuesta

Dado el carácter general de la definición del valor propuesta en el modelo MIV (donde se contempla un número genérico de requerimientos), es necesario plantear una articulación matemática que permita considerar la multiplicidad de requerimientos existentes en el caso general. Para ello deberá plantearse una generalización de la definición de la función del valor propuesta en el apartado anterior, ya que se ha definido para un solo requerimiento.

El modo de considerar la multiplicidad de requerimientos

Con este objetivo de integrar la multiplicidad de requerimientos, se plantea una función del valor genérica de la alternativa como una relación de las funciones del valor de cada requerimiento, es decir,

$$v = f(v_1(x_1), \dots, v_n(x_n)) \quad (3.2.)$$

siendo n el número de requerimientos considerado. Esto equivale a la medición de la satisfacción global de la alternativa a partir del grado de satisfacción alcanzado respecto los diversos requerimientos.

La función “ $f(\cdot)$ ” elegida es la forma aditiva simple, de manera que el valor de la alternativa se calculará como el sumatorio ponderado de las funciones de valor de los diversos requerimientos,

$$v = \sum_{i=1}^n k_i \cdot v_i(x_i) \quad (3.3.)$$

donde k_i es el peso de cada requerimiento, que cumple la propiedad,

$$\sum_{i=1}^n k_i = 1 \quad (3.4.)$$

dado que representa la importancia relativa de los diversos requerimientos en el grado de satisfacción global.

El árbol de requerimientos

Para considerar la interdependencia de los requerimientos y el despliegue de estos en otros de mayor grado de detalle o desarrollo, se plantea la necesidad de una estructuración de los mismos coherente con la formulación anteriormente propuesta. Con este objetivo, se define en esta tesis una herramienta a la que se denomina “árbol de requerimientos”, cuya misión es servir de base para la identificación y ordenación de las entradas del sistema MIV. Mediante este esquema, los diversos requerimientos se irán desarrollando mediante la ramificación continua del citado árbol, según el grado de desarrollo deseado (véase el esquema de la figura 3.8) y en los diversos planos considerados.

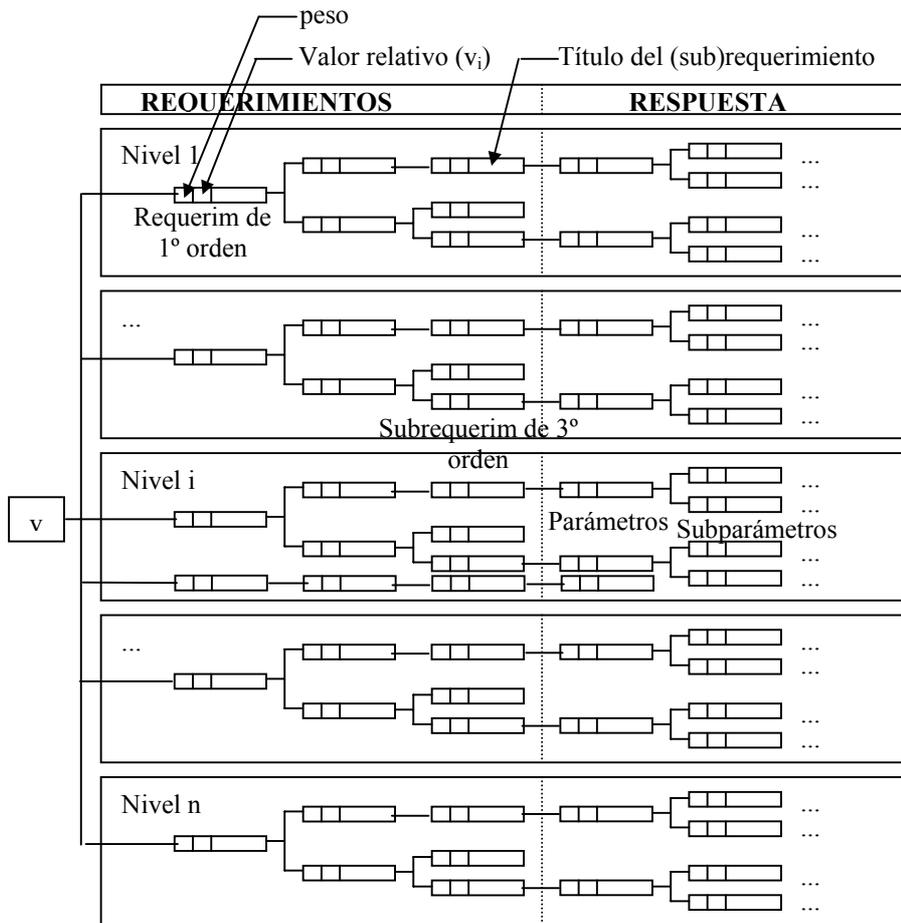


Figura 3.8. Concepto de árbol de valor según se plantea en esta tesis.

Según se observa en la figura anterior, los requerimientos pueden desplegarse a juicio del decisor en otros más concretos. Este despliegue del árbol está asociado al punto de decisión considerado (recuérdese al respecto la figura 3.3), es decir, si es una decisión de tipo general el grado de despliegue será reducido, mientras que analizar una decisión de carácter más específico requerirá desplegar el árbol hasta el grado de concreción deseado. Así, por ejemplo, en el caso de un proyecto constructivo, si se plantea una decisión en primeras etapas, el requerimiento considerado será el coste de coste de construcción global. Sin embargo, en una decisión en etapa de diseño el citado requerimiento general se desplegará y se concretará en el relativo a la parte del proyecto considerada en la toma de decisión, por ejemplo la cimentación.

En coherencia con la estructura del árbol de requerimientos, se propone una generalización de la expresión 3.3, de manera que permita la integración de las diversas ramas de este árbol planteado,

$$V = \sum_{i=1}^{n1} k_{1i}^1 \cdot \left(\sum_{i_2=1}^{n2} k_{i_2}^2 \cdot \dots \cdot \left(\sum_{i_m=1}^{n_m} k_{i_m}^m \cdot v_{i_m}^m (x_1^{i_m}, x_2^{i_m}, \dots, x_{l_m}^{i_m}) \dots \right) \right) \quad (3.5.)$$

$$\text{donde } v_{i_m}^m(x_1^{i_m}, x_2^{i_m}, \dots, x_l^{i_m}) = \sum_{k=1}^{n_m} w_k^{i_m} \cdot v_{i_m}^m(x_k^{i_m}) \quad (3.6.)$$

y donde $v_j^i(\cdot)$ son las funciones de valor de los diversos requerimientos, x_j^i los parámetros de respuesta, k_j^i es el peso relativo de cada (sub)requerimiento según el árbol definido y w_j^i la importancia relativa de los diversos parámetros que intervienen en la evaluación de un cierto requerimiento.

El concepto de despleabilidad

Este carácter desplegable del árbol de requerimientos de forma coherente e integrada con la formulación propuesta lleva a definir un nuevo concepto, al que se denomina “desplegabilidad”. A la luz de lo explicado anteriormente, dicho concepto podría definirse como la capacidad de generar nuevos requerimientos a partir de los ya existentes en cada una de las ramas del citado árbol, desde un nivel general a otro con un grado de concreción mayor.

Esta característica dota a la formulación propuesta de un carácter flexible y adaptable a cualquier tipo de problema. De hecho, mediante esta propiedad se consigue articular el carácter dinámico del concepto de valor, y consecuentemente de su formulación, según el nivel de generalidad en el que se desee aplicar. Por tanto, el nuevo planteamiento se articula mediante una ligazón lógica entre los diversos requerimientos derivada de su despliegue según el grado de detalle deseado (véase el esquema de la figura 3.9.). Esta nueva perspectiva constituye algo más que un simple agrupamiento, ya que permite una estructuración simultánea a la identificación de requerimientos, y no una simple ordenación a posteriori de los mismos sin una guía sistemática para su identificación.

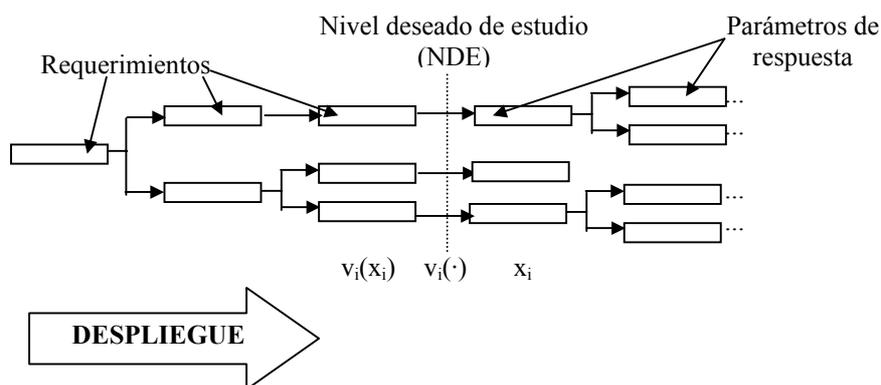


Figura 3.9. Visualización del concepto de despleabilidad en una rama del árbol de requerimientos

Por consiguiente, este concepto de despleabilidad, permite, por una parte, el análisis lógico de los requerimientos y de su desarrollo y concreción, y por otro lado dota a la formulación propuesta de una importante flexibilidad, dado que el nivel de profundización deseada en el análisis de la toma de decisión podrá articularse mediante el grado de desarrollo deseado de los requerimientos. Este último concepto se articula mediante lo que se denomina “nivel deseado de estudio” (en adelante NDE), que

marcaría el límite deseado de despliegue del árbol de requerimientos y, por tanto, la frontera entre estos y los parámetros de respuesta; es decir, entre las entradas y las salidas del sistema. En el momento en que se considere suficiente el despliegue de este árbol, se plantearán los parámetros de respuesta acordes con el nivel de desarrollo del mismo. De esta manera, una variable puede ser considerada como parámetro de respuesta en un nivel de estudio más general, con un grado de concreción (desarrollo del árbol) reducido, o como requerimiento, en un punto de análisis correspondiente a un nivel posterior o más desarrollado.

La consideración del NDE (nivel deseado de estudio) definido anteriormente, adquiere especial trascendencia al considerar la influencia en el tiempo de las decisiones, como por ejemplo la repercusión de una decisión sobre un proyecto constructivo a lo largo de su ciclo de vida. En este caso, en las primeras etapas, el árbol de requerimientos presentará, como es obvio, un menor grado de desarrollo que en un punto correspondiente a un nivel de desarrollo más avanzado en el tiempo. Sin embargo, su repercusión será mayor, ya que afectará a requerimientos primarios de los cuales dependen el resto de requerimientos generados como consecuencia de desplegar el árbol. Por tanto, la estructura del árbol de requerimientos y la formulación propuesta son coherentes con el hecho de que las decisiones en primeras etapas tienen una mayor repercusión o trascendencia que las de carácter más específico, suscitadas en momentos posteriores del ciclo de vida del proyecto. A este respecto, en la figura 3.9 se observa el despliegue de un requerimiento en otros de mayor grado de concreción hasta el nivel deseado (NDE). A partir de este nivel se plantearán los parámetros de respuesta que proporcionarán una base cuantitativa para la medición de la satisfacción a través de las funciones de valor de los (sub)requerimientos. En la citada figura también se observa que los parámetros de respuesta x_i pueden asimismo desplegarse en otros, como por ejemplo en el caso del cálculo de un coste, el cual puede depender de otros costes (por ejemplo, el coste de la cimentación de un edificio depende del coste de excavación, de los materiales, de la mano de obra, etc.).

De lo dicho hasta ahora se desprende que, según la decisión considerada, podrán desplegarse algunos requerimientos y otros no. Obviamente, los requerimientos desplegados serán aquellos a los que afecte la toma de decisión considerada.

Finalmente cabe observar que, según el planteamiento realizado, la diferencia entre requerimientos y respuestas es a veces sutil, de manera que podría darse el caso de que, dependiendo de dónde se desee situar el citado NDE (Nivel Deseado de Estudio), un aspecto o concepto fuese percibido como requerimiento por una persona y como respuesta por otro, siendo ambas opciones razonables. Por otro lado, un mismo concepto podría ser un parámetro de respuesta en una cierta toma de decisión de carácter más general o un requerimiento en una decisión más específica. Para glosar esta idea, baste pensar en el coste de construcción en global. Desde un punto de vista estratégico podría considerarse sin lugar a error como un parámetro de un requerimiento más general de tipo económico como podría ser la rentabilidad. Sin embargo, en un análisis posterior referente, por ejemplo, a la elección de la tipología de un cierto componente, el coste de construcción sería claramente un requerimiento. De hecho, en un nivel mayor de abstracción, podría decirse que la frontera entre requerimientos y respuestas tiene un cierto grado de flexibilidad y se mueve a lo largo de los distintos niveles del árbol lógico de decisión marcando la diferencia entre requerimientos y

parámetros de respuesta. En definitiva, el citado ejemplo y la característica observada no es sino una prueba más de la flexibilidad y versatilidad de la metodología aquí presentada. Esta idea se visualiza mediante la figura 3.10, que representa esa posible movilidad de la distinción entre requerimientos y parámetros de respuesta.

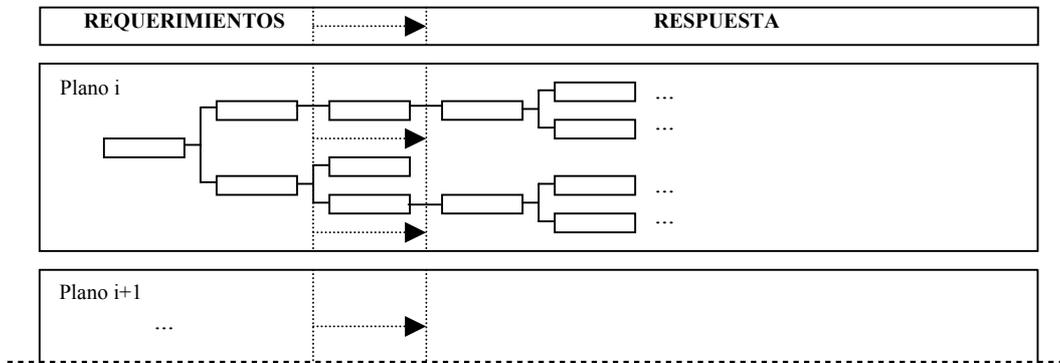


Figura 3.10. Concepto de flexibilidad entre requerimientos y parámetros de respuesta según el tipo de toma de decisión considerada

3.3.3. Los parámetros de respuesta. Sus tipos y forma de medición

Tal como se comentaba anteriormente, los parámetros de respuesta son aquellos que permiten cuantificar diversos aspectos en orden a estimar el grado de satisfacción conseguido en cada uno de los requerimientos considerados.

Los tipos de parámetros de respuesta

La variabilidad de los parámetros de respuesta es muy grande, ya que el carácter general de la definición propuesta admite la integración de multitud de tipos de elementos de evaluación, siempre que constituyan un apoyo para la medición del grado de satisfacción respecto a los diversos requerimientos.

En cualquier caso, cabe identificar dos grandes grupos de parámetros según su modo de medición sea cuantitativo o cualitativo (figura 3.11.). Aunque en ocasiones se distinguen ambos casos con la denominación de variables y atributos, en esta tesis se designarán de forma unitaria como “parámetros”, distinguiéndose su carácter cuantitativo o cualitativo únicamente a la hora de evaluarlos.

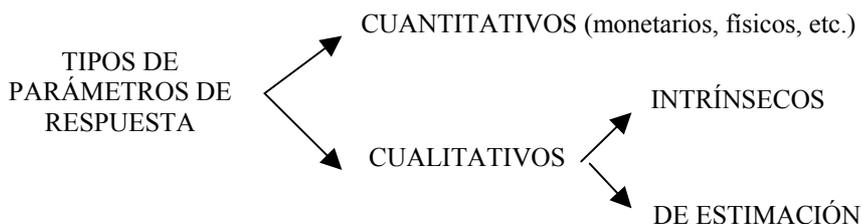


Figura 3.11. Tipos de parámetros de respuesta

Entre los parámetros cuantitativos cabe destacar los de tipo monetario, físico, etc, mientras que entre los de carácter cualitativo cabría diferenciar aquellos que hacen referencia a una realidad intrínsecamente cualitativa, como por ejemplo los relacionados con la estética, y los que se consideran como tales para eludir una medición que sería inabordable en la práctica, bien por sus características o por los condicionantes del estudio realizado. Así, por ejemplo, los beneficios económicos de un cierto proyecto para la sociedad son a menudo difíciles de cuantificar en términos monetarios, por lo que cabría realizar una medición cualitativa a pesar de ser intrínsecamente cuantitativos.

La medición de los parámetros de respuesta

- a) Parámetros cuantitativos: La medición cuantitativa se realizará según los patrones o métodos específicos de cada tipo de parámetro, mediante la utilización de las herramientas de tipo económico, físico, ingenieril, etc. diseñadas en los diversos campos de la ciencia.
- b) Parámetros cualitativos: Se medirán por puntuación en una escala del 1 al 10 o similar. Es importante recalcar que esto no implica necesariamente que las puntuaciones deban ser números enteros. Así, por ejemplo, podría darse el caso de que se evaluaran dos alternativas en una escala del 1 al 10 con un 0,1 y un 7, dado que no se considera suficiente una proporción de 1 a 7 para describir la percepción del o de los decisores respecto a ambas opciones.

3.3.4. El cálculo de los pesos de los requerimientos: el método CIP

Planteamiento del proceso de cálculo propuesto

El método aquí propuesto para el cálculo de los pesos de los requerimientos, k_i , se denomina mediante el acrónimo “CIP”, en referencia a sus siglas: “Cálculo Integrado de los Pesos”. Consta de un proceso de cuatro etapas, según se muestra en la figura 3.12 (ver página siguiente). Según se indica en la citada figura, este procedimiento parte de una ordenación o jerarquización cualitativa de los requerimientos considerados. Con base en ella se realizará en una segunda fase una medición de los pesos relativos de los mismos a partir de una matriz de comparación, donde se estima la proporción de importancia mediante la comparación por pares de los requerimientos. A partir de esta matriz, se calcularán matemáticamente los pesos (fase 3) y un coeficiente numérico que indicará si la estimación de la segunda etapa ha sido suficientemente consistente o si se ha de volver atrás en el proceso. En el diseño de este procedimiento se han utilizado de forma puntual ideas e instrumentos generados en el ámbito de la teoría de decisiones, los cuales se indican en el diagrama de flujo de la figura 3.12, donde se sintetiza el proceso de cálculo diseñado.

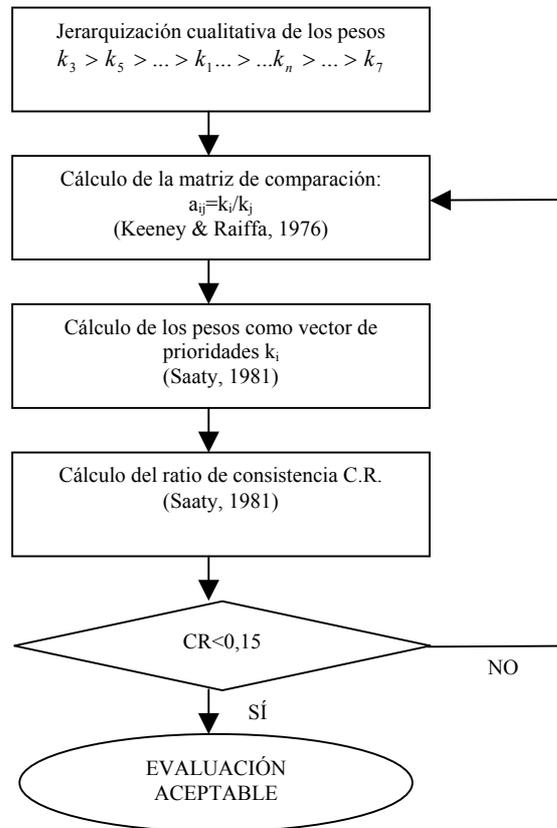


Figura 3.12. Diagrama de flujo del proceso propuesto para la evaluación de los pesos en una cierta rama del árbol de valor

Esta evaluación se llevará a cabo en un cierto nivel de desarrollo del árbol, de manera que los requerimientos generados a partir de uno ya existente requerirán nuevamente la aplicación del proceso. Obviamente, en este caso los subrequerimientos correspondientes a un nivel de concreción mayor cumplirán la condición,

$$\sum_{i=1}^n k_i^j = k^j \quad (3.7.)$$

Por tanto, la evaluación de los pesos será progresiva a medida que se vaya desplegando el árbol. En cualquier caso, siempre se partirá de una evaluación inicial en el primer nivel de desarrollo o despliegue. En la figura 3.13 se representa la evaluación progresiva de los pesos de los requerimientos en el árbol descrito en el apartado anterior. En ella se observa la evaluación inicial y las posteriores aplicaciones del método CIP en cada una de las ramas en la medida en que se desee desplegar el árbol.

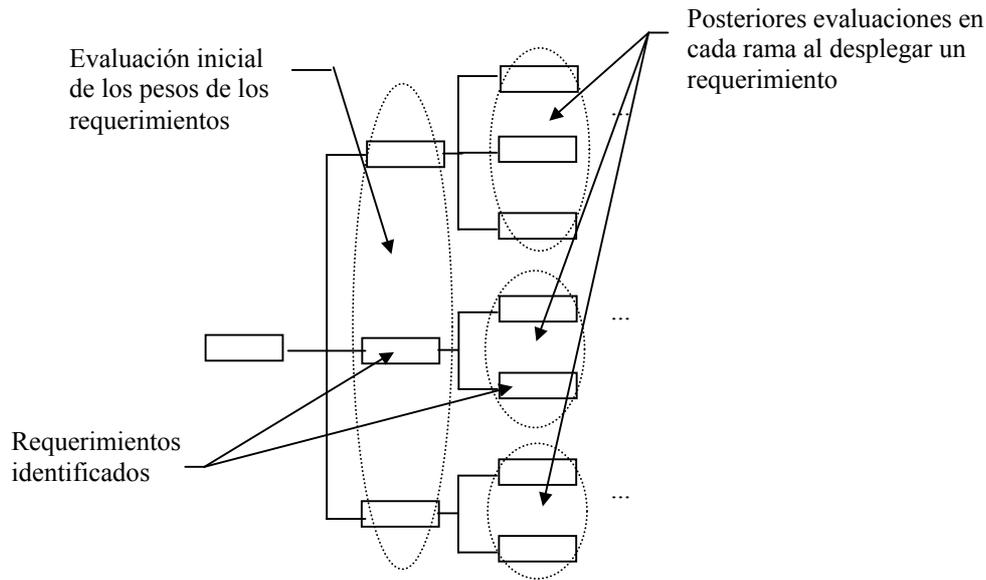


Figura 3.13. Evaluaciones sucesivas de los pesos al desplegar el árbol de requerimientos

Una vez descrito de forma genérica el proceso del método CIP, a continuación se describirá en detalle cada una de las fases recogidas en la figura 3.12 y las herramientas matemáticas utilizadas.

Fase 1: Jerarquización u ordenación cualitativa de la importancia de los pesos

Tal como se indica en la figura 3.12, en primer lugar se llevará a cabo una ordenación previa de los requerimientos de forma cualitativa. El modo de realizar esta jerarquización se deja abierto, al juicio del decisor, de modo que pueden ser aplicables diversas técnicas (como por ejemplo la comparación por pares, comentada en los apéndices C e I) o bien puede hacerse de forma directa. El resultado de esta operación previa sería una relación del tipo,

$$k_3 > k_5 > \dots > k_1 \dots > \dots k_n > \dots > k_7 \tag{3.8.}$$

Fase 2: Cálculo de la matriz de comparación

A partir de esta ordenación inicial se plantea la construcción de una matriz de comparación, a la que por brevedad se denominará A, y cuyos componentes se plantean como cociente entre los pesos analizados,

$$a_{ij} = \frac{k_i}{k_j} \tag{3.9.}$$

La estimación de estos cocientes puede llevarse a cabo de forma directa o bien mediante un razonamiento análogo al realizado por Keeney & Raiffa (1976) en el contexto de la teoría de la utilidad multiatributo, el cual es aplicable aquí. En concreto, si se parte de la igualdad genérica,

$$v(x_1^{\min}, x_2^{\min}, \dots, x_i^*, \dots, x_n^{\min}) = v(x_1^{\min}, x_2^{\min}, \dots, x_j^{\max}, \dots, x_n^{\min}) \quad (3.10.)$$

donde x_i^{\min} y x_i^{\max} corresponden a los valores donde el valor correspondiente al requerimiento i alcanza un valor máximo (1) o mínimo⁴ (0) en valor absoluto⁵, y x_i^* es un valor medio del requerimiento i correspondiente al punto de equivalencia con el valor de máxima satisfacción del requerimiento j . Desarrollando la expresión anterior mediante la expresión de la función del valor en el primer nivel de despliegue del árbol de requerimientos (la expresión 3.5. se reduce como caso particular a la 3.3.) se obtiene,

$$k_1 \cdot v_1(x_1^{\min}) + \dots + k_j \cdot v_j(x_j^*) + \dots + k_n \cdot v_n(x_n^{\min}) = k_1 \cdot v_1(x_1^{\min}) + \dots + k_i \cdot v_i(x_i^{\max}) + \dots + k_n \cdot v_n(x_n^{\min}) \quad (3.11.)$$

y considerando que

$$\begin{aligned} v_i(x_k^{\min}) &= 0; \quad \forall i = 1, \dots, n \\ v_k(x_k^{\max}) &= 1; \quad \forall k = 1, \dots, n \\ v_j(x_j^*) &= a \end{aligned} \quad (3.12.)$$

siendo a un valor genérico, se obtiene que

$$a = \frac{k_i}{k_j} = a_{ij} \quad (3.13.)$$

por otro lado, es obvio que se cumple el requisito de que si $i=j$ $a_{ij}=1$, dado que con esta condición

$$\begin{aligned} v(x_1^{\min}, x_2^{\min}, \dots, x_i^*, \dots, x_n^{\min}) &= v(x_1^{\min}, x_2^{\min}, \dots, x_i^{\max}, \dots, x_n^{\min}) \\ &\Downarrow \\ x_i^* &= x_i^{\max} \\ &\Downarrow \\ a_{ij} &= a = v_i(x_i^*) = v_i(x_i^{\max}) = 1 \end{aligned} \quad (3.14.)$$

Por consiguiente, los valores de los citados cocientes, componentes de la matriz A anteriormente citada, se calcularán preguntando al o a los decisores sobre qué valor del parámetro de respuesta correspondiente al requerimiento más valorado de los dos en comparación (x_i^*) le produce igual satisfacción que el máximo valor del parámetro menos importante (de los dos considerados). En cualquier caso, la evaluación de los

⁴ Obviamente en el mínimo absoluto, según se ha definido, la función $v(\cdot)$ alcanzaría un valor de -1 . Con este mínimo se hace referencia, por tanto, al valor que produce una satisfacción mínima, es decir, nula, ya que el valor -1 correspondería no ya a satisfacción mínima sino a insatisfacción.

⁵ Según la definición propuesta de función del valor, x^{\max} y x^{\min} no tienen por qué coincidir con los valores extremos del intervalo de variación de x considerado.

citados coeficientes a_{ij} se deja abierta, de modo que se considera aplicable cualquier modo de estimación siempre que aporte un resultado numérico fiable.

Según se deduce del planteamiento realizado, en lo que hace referencia a las características de la matriz de comparación, cabe destacar las siguientes:

- En primer lugar, los valores de la matriz de la comparación pueden ser cualquier número real positivo (no necesariamente naturales). Es decir,

$$a_{ij} \in \mathfrak{R}; \quad a_{ij} \geq 0$$

- Por otro lado, será una matriz cuadrada (de $n \times n$, siendo n el número de requerimientos considerados, correspondientes al nivel vertical de una cierta rama del árbol de decisión)
- Así mismo, cumplirá la siguiente relación, deducida del carácter comparativo de sus componentes,

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (3.15.)$$

- Finalmente, tal como se ha razonado con anterioridad, los componentes de la diagonal de la matriz serán la unidad.

Fase 3: Cálculo del vector de pesos (k_1, \dots, k_n)

A partir de las componentes de la matriz de comparación (a_{ij}), se calcularán los pesos de los requerimientos (k_i) mediante el método simplificado propuesto por Saaty (1981),

$$k_i = \frac{k^*_i}{\sum_{i=1}^n k^*_i}; \quad \text{donde} \quad k^*_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad (3.16.)$$

La justificación teórica de esta relación se recoge en el apéndice B de esta tesis, en lo relativo al método del “Proceso Analítico de Jerarquización” o AHP.

Fase 4: Cálculo de la consistencia de la evaluación

Finalmente se estimará la consistencia o coherencia de la evaluación llevada a cabo en la estimación de los coeficientes de la matriz de comparación (a_{ij}), mediante la adaptación del coeficiente de consistencia propuesto por Saaty (1981), al que en este contexto se le denominará CC y cuyo calculo se articula mediante la siguiente expresión

$$CC = \frac{IC}{IA} \quad (3.17.)$$

donde IC es el “Índice de Consistencia” de la evaluación, definido como

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3.18.)$$

donde λ_{max} el máximo valor propio asociado a dicha matriz de comparación, calculado mediante la expresión

$$\lambda_{max} = \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^n a_{ij} \right) \cdot k_j \quad (3.19.)$$

Por otro lado, el término IA es el “Índice de Aleatoriedad”, cuyos valores son los recogidos en la tabla 3.1.

Tamaño de la matriz (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice de consistencia aleatoria (R.I.)	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Tabla 3.4. Índices de Aleatoriedad de las matrices de decisión según su orden

En definitiva el cociente del coeficiente CC expresa un valor relativo de la inconsistencia, de manera que si su valor es 1 indica que la inconsistencia es del 100 %, y si es 0, el juicio emitido es totalmente coherente. Expresa, por tanto, una expresión del error en términos relativos. La justificación de este modo de medir la consistencia de la evaluación está recogida en el apéndice B de esta tesis, en la parte relativa al método AHP (Proceso Analítico de Jerarquización). Según lo recomendado en la citada metodología, se establecerá una tolerancia del 10% (o un valor de CC de 0,10) para calificar de buena una ponderación, siendo aceptables resultados hasta de un 15%. Si el resultado indica que el juicio realizado no es suficientemente coherente ($CC > 0,15$), deberá volverse a realizar el proceso desde la primera fase, repitiéndolo de forma iterativa hasta conseguir que la incoherencia en el juicio entre dentro de la tolerancia ($CC < 0,15$)

Consideraciones prácticas

Cuando el número de requerimientos cuyos pesos k_i se desean evaluar mediante este método es mayor que 10, no es conveniente aplicarlo por motivos prácticos y también teóricos⁶. Por ello, se recomienda aplicar de forma flexible la regla de Pareto⁷ para hacer una evaluación iterativa de aquel grupo de requerimientos que se consideren más importantes en cada caso. Aunque en sentido estricto este principio supone que el

⁶ Para $n > 10$ el índice IA anteriormente descrito no está calculado por Saaty (1981), y, aunque sería posible hacerlo, no es justificable desde el punto de vista práctico. Por otro lado, existe el peligro de acumulación de error cuando el número de elementos comparados es elevado (Saaty, 1981).

⁷ Recuérdese que la Ley del célebre economista italiano Pareto, en grandes trazos postula que el 80% de las riquezas están reunidas en el 20% de la población. Este principio, que ha sido ampliamente utilizado en diversos campos, se adapta en ocasiones expresando que el 80% de los fallos se concentran en un 20% de las posibles causas o factores. Recuérdese que se ha utilizado también para seleccionar alternativas (Apéndice I).

80% del valor depende de un 20% de los requerimientos, en este caso, se recomienda simplemente seleccionar iterativamente aquellos que se consideren más relevantes y estimar el porcentaje de valor que suponen con relación al resto. De este modo, se evaluará un grupo de requerimientos mediante subconjuntos con un número reducido de elementos.

3.4. EL TRATAMIENTO DEL RIESGO

3.4.1. Los requisitos de la nueva propuesta

Llegado este punto de desarrollo de la tesis, se han sentado las bases para una nueva propuesta de tratamiento integral del concepto de riesgo que aporte un mayor grado de generalización y un enfoque más global e integrado que las técnicas actualmente existentes. Este objetivo general se intentará articular a través de las siguientes características, desarrolladas a continuación:

- i) que sea coherente e integrada con la definición y formulación del valor propuestas en los apartados anteriores.
- ii) que refleje el carácter transversal del riesgo
- iii) que contemple y fusione de manera lógica y coherente la distinción entre riesgos especulativos y riesgos puros
- iv) que busque una alternativa al tratamiento probabilístico que evite las dificultades prácticas de estimación de la probabilidad a la que se hacía referencia en capítulos anteriores

En primer lugar, en lo relativo a la integración con la definición y formulación del valor propuestas anteriormente, el nuevo tratamiento debe estar integrado de forma coherente en la definición y formulación del valor propuestas en apartados precedentes. De otro modo no podría articularse la toma de decisión de modo unitario, y ambos conceptos de valor y riesgo aportarían una comprensión separativa del problema, que en ocasiones podría llevar a confusión.

Por otro lado, en referencia a sus efectos, la nueva propuesta debe reflejar el hecho de que los riesgos pueden producir un impacto transversal a los principales planos o niveles de estudio de la realidad considerada⁸. En coherencia con la definición sistémica de valor propuesta en el apartado 3.2, podría visualizarse esta transversalidad mediante la figura 3.14, donde se observa que un cierto riesgo puede afectar a aspectos de diversa índole. A modo de ejemplo, baste considerar el ejemplo de un proyecto constructivo, donde un riesgo relativo a las condiciones climatológicas puede afectar a los costes de construcción (plano económico), al plazo de ejecución (plano temporal), a la seguridad de los trabajadores (plano social), etc.

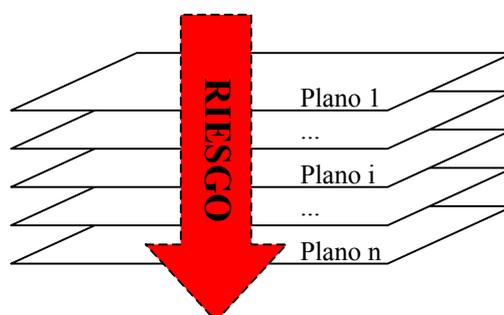


Figura 3.14. Efecto transversal del concepto de riesgo

⁸ Recuérdese el concepto de “plano de estudio” definido como elemento de la definición sistémica del valor (MIV) propuesta en el apartado 3.2.

Esta transversalidad hace que la naturaleza del concepto de riesgo requiera un tratamiento matemático radicalmente diferente del propuesto para el concepto de valor. Esta es la razón por la que no se hablará de “formulación” del concepto de riesgo sino de “tratamiento” o “modo de evaluación”, es decir, se intentará describir cómo influye la consideración del riesgo en las variables de la formulación del valor anteriormente propuesta y, por tanto, en el resultado de este índice⁹.

Asimismo, la propuesta pretende articular un tratamiento que contemple la doble naturaleza del concepto de riesgo correspondiente a las dos tipologías a las que se hacía referencia en el apartado 2.4. de esta tesis: riesgos puros y especulativos¹⁰. Ignorar uno de ellos sería dejar cojo e incompleto el tratamiento del concepto de riesgo. Además, ambas maneras de cuantificación deben ser integrables para que el planteamiento no pierda unidad ni coherencia.

Finalmente, la nueva propuesta intenta constituir una alternativa al tratamiento probabilístico que evite las dificultades prácticas de estimación de la probabilidad a la que se hacía referencia en capítulos anteriores. Para ello se propone un tratamiento matemático mediante el uso de matemática difusa, inserto en lo que en capítulos anteriores¹¹ se ha denominado “paradigma posibilista”.

3.4.2. Redefinición del concepto de riesgo

El primer punto de la propuesta pasa necesariamente por una nueva definición del concepto de riesgo que sirva de fundamento teórico al aparato matemático de evaluación. Esta nueva definición partirá de los desarrollos teóricos descritos en el capítulo 2 con vocación de superarlos y lograr una descripción más esencial, global y completa del concepto en estudio. Dicha definición se formula de la siguiente manera:

“El riesgo es una incertidumbre en el juicio por la falta de conocimiento perfecto en la previsión de los resultados relativos a los diversos planos de estudio considerados o por la posible variación de estos a causa de sucesos o agentes que tengan influencia sobre la realidad considerada”

Tal como se observa, la forma disyuntiva de esta definición contempla las dos tipologías de riesgo a las que se ha hecho referencia repetidamente a lo largo de esta tesis: los riesgos puros y los riesgos especulativos. Además, refleja el carácter transversal del concepto, al hacer referencia a la posible variación de los resultados previstos en los diversos planos (económico, temporal, etc.). Asimismo, la referencia a los resultados le hace aplicable al concepto de valor anteriormente definido (según lo

⁹ Esta consideración es coherente con el tratamiento matemático clásico de la incertidumbre en la formulación de la utilidad (recuérdese lo descrito en el apartado 2.2 de esta tesis). Si se considera el criterio del valor esperado aplicado a la fórmula de la utilidad, cabe observar que la incertidumbre no introduce una nueva formulación, sino que influye en los valores de la formulación existente.

¹⁰ Recuérdese que esta distinción define los riesgos especulativos como una incertidumbre (usualmente pequeña) asociada a la estimación de los resultados previstos y los riesgos puros como factores de incidencia que pueden provocar variaciones considerables en los resultados.

¹¹ Apartado 2.4. de esta tesis.

descrito en el apartado 3.3, los resultados son la respuesta a los requerimientos formulados, es decir, los valores numéricos de los parámetros x_i considerados). Finalmente, cabe comentar que la anterior definición no incluye el concepto de probabilidad, sino que hace una clara referencia al enfoque posibilista al utilizar la expresión “posible variación”.

A partir de aquí, la integración de esta definición del riesgo en la definición sistémica del valor del modelo MIV descrito en apartados anteriores es directa. Su visualización se articula mediante la figura 3.15, de modo que completa la definición del valor de una alternativa recogida en la figura 3.2 mediante la integración del elemento riesgo.

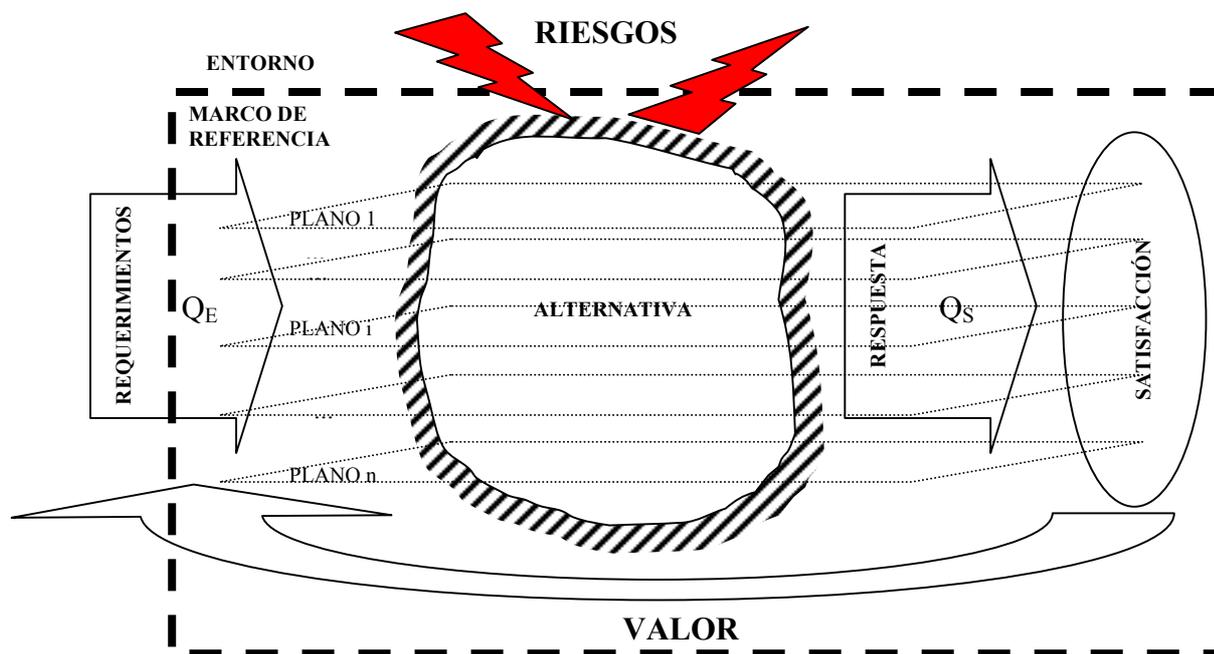


Figura 3.15. La integración del riesgo en la definición sistémica del

A partir de esta definición integrada con la de valor, se expondrá a continuación el aparato matemático diseñado a los efectos de esta tesis para las dos tipologías de riesgos considerados: riesgos especulativos y riesgos puros.

3.4.3. El tratamiento de los riesgos especulativos

3.4.3.1. La matemática difusa¹² como alternativa al tratamiento probabilista

Tal como se comentaba anteriormente, la propuesta de tratamiento de los riesgos especulativos que aquí se plantea intenta constituir una alternativa al uso de la teoría de la probabilidad, de modo que pretende eludir la estimación de las probabilidades asociadas a los diferentes resultados. Tal como se apuntaba anteriormente, la necesidad de plantear esta alternativa metodológica se desprende de las dificultades asociadas a la

¹² En terminología internacional "fuzzy logic".

estimación de la probabilidad, tanto en un nivel general¹³ como, más en particular, en el contexto de la gestión de proyectos, donde existe una gran singularidad y poca repetitividad. De ello se desprende que el análisis probabilístico es difícilmente viable en este ámbito desde el punto de vista práctico (recuérdese lo comentado al respecto en el apartado 2.4 del estado del conocimiento).

Para visualizar esta idea con un ejemplo, baste considerar la incertidumbre asociada al plazo de ejecución de la obra. Desde el punto de vista práctico, no parece tener mucho sentido ni viabilidad fijar una serie de valores y estimar una probabilidad asociada a cada uno. Por otro lado, dada la singularidad de todo proyecto, los datos históricos asociados a otras obras darán simplemente una idea del orden de magnitud, si bien no tendría sentido ajustar una cierta distribución estándar, a no ser que se trate de obras muy repetitivas y exista un buen número de datos históricos, lo cual no es común. En definitiva, desde el punto de vista práctico y en un contexto de trabajo en equipo o de toma de decisión bajo presión, será más factible estimar un rango de variación o un intervalo aproximado donde se suponga que estará el resultado.

Con este objetivo, se hará uso del tratamiento de la matemática difusa (cuyos conceptos fundamentales se recogen en el Anejo B). En palabras de uno de sus máximos exponentes, (Zadeh, 1965) este tipo de matemática “aporta un modo natural de tratar problemas en los cuales la fuente de imprecisión no es ya la presencia de variables aleatorias, sino la ausencia de criterios de pertenencia a clases predefinidas”¹⁴. Es decir, supone un nuevo modo de tratar la incertidumbre, distinto del tratamiento probabilístico clásico que intenta incidir en las lagunas de este último.

3.4.3.2. Representación y notación del tratamiento matemático propuesto

Este intervalo más probable en el que se estima estará el resultado del parámetro a estimar se modelizará mediante un conjunto difuso¹⁵, cuyo sentido físico pretende representar la incertidumbre, imprecisión o falta de conocimiento perfecto acerca de su valor numérico, de modo que únicamente se conoce su zona más probable de ubicación. Mediante esta idea pretende visualizarse el carácter difuso o incierto de ese número. Por ejemplo, el plazo de ejecución de una obra, constituye una muestra clara de número difuso, ya que a priori es imposible determinar exactamente cuál será su duración, si bien se puede estimar dentro de unos límites razonables.

Para articular esta idea se utilizará el lenguaje propio de este tipo de matemática, adaptado a los propósitos de esta investigación. En concreto, en el contexto de la presente propuesta se representará de modo general un conjunto difuso mediante una

¹³ Recuérdense las dificultades a las que se hacía referencia en el apartado 2.2 y descritas en el apéndice B de esta tesis.

¹⁴ Esta “pertenencia a clases predefinidas” corresponde al concepto de “función de pertenencia” según lo definido en el contexto de la matemática difusa (Apéndice E)

¹⁵ En terminología internacional "fuzzy set"

función de pertenencia¹⁶, $\mu(x)$, de tipo trapezoidal, cuya variación entre 0 y 1 describe la pertenencia a ese entorno difuso de mayor probabilidad anteriormente descrito. Dicha función de pertenencia se define matemáticamente de la siguiente manera,

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \text{ ó } x \geq d \\ 1 & \text{si } b \leq x \leq c \\ 1 + \frac{x-b}{b-a} & \text{si } a \leq x \leq b \\ 1 - \frac{x-c}{d-c} & \text{si } c \leq x \leq d \end{cases} \quad (3.20.)$$

donde b y c son los números reales que marcan el intervalo donde es más posible que esté el resultado correspondiente al parámetro x (por ejemplo, tiempo de ejecución del proyecto) y a y d definen el carácter difuso de la frontera de este intervalo. En otras palabras, los números comprendidos entre a y b serían los de mayor grado de pertenencia y los comprendidos en la frontera difusa (entre a y b y entre c y d) tendrían un grado de pertenencia decreciente hacia el exterior del intervalo. En este sentido debe aclararse que el hablar de mayor o menor "posibilidad" o "grado de pertenencia" implica que no se conoce la probabilidad asociada a cada x ni interesa conocerla, ya que se trata de un tratamiento alternativo al probabilístico. La forma trapezoidal de esta función es la recogida en la figura 3.16.

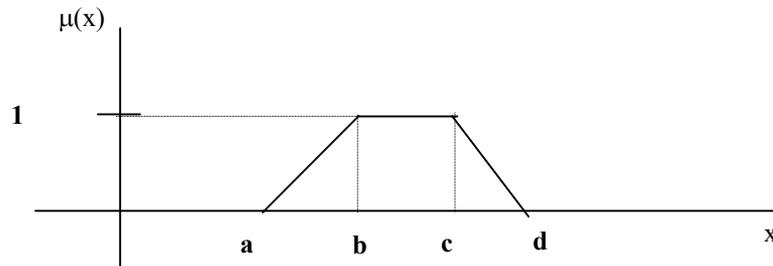


Figura 3.16. Representación general de un número difuso según la adaptación propuesta en esta tesis.

Como es obvio, los números a, b, c y d deben cumplir la siguiente condición,

$$a \leq b \leq c \leq d \quad (3.21.)$$

Como observación cabe comentar que, según lo definido anteriormente, podría definirse un "margen" de error en la estimación mediante los valores de c y d,

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= b-a \\ \varepsilon_2 &= d-c \end{aligned} \quad (3.22.)$$

es decir, el decisor podría estimar el resultado de x mediante un intervalo (b,c) y un cierto margen de error. Por ejemplo, podría estimar un coste de una cierta partida entre 45 y 46 miles de euros con un margen adicional de error ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2$) de 500 euros.

¹⁶ En terminología internacional "membership function". (Consúltese al respecto el apéndice B)

La notación para estos conjuntos difusos se establece de forma general como $T_{a,b,c,d}$ en referencia a su forma trapezoidal y los cuatro números mediante los que se determina. En el lugar de la T se situará el nombre de la variable considerada (x, v(x), etc.). En adelante, a este tipo de elemento difuso se denominará en referencia a su forma "trapezio en \mathfrak{R} " (siendo \mathfrak{R} el conjunto de números reales) y el conjunto de trapecios de este tipo se notará como:

$$\mathfrak{G}_{\mathfrak{R}} = \{ T_{a,b,c,d} / a \leq b \leq c \leq d \} \tag{3.23.}$$

siendo a, b, c, d números reales que cumplan la condición especificada en la expresión 3.21.

Por otro lado, según se observa en la figura 3.17, es interesante observar cómo los números y los intervalos reales quedan englobados como casos particulares de esta representación. En concreto, un número real -al que en el ámbito de la matemática difusa se le suele denominar "crisp"- sería un número difuso con una longitud de variación y una difusión de la frontera nulas, es decir, $a=b=c=d$ ($\varepsilon_1=\varepsilon_2=0$). Un intervalo real, por su parte, sería un número difuso con frontera no definida, es decir, $a=b$ y $c=d$ ($\varepsilon_1=\varepsilon_2=0$). Finalmente, en caso de suponer $b=c$ y $\varepsilon_1=\varepsilon_2=\varepsilon$ distintos de cero, la representación propuesta correspondería a los números difusos convencionales. Cabe observar al respecto que este último caso implicaría considerar un grado de pertenencia distinto para todos los puntos del intervalo considerado.

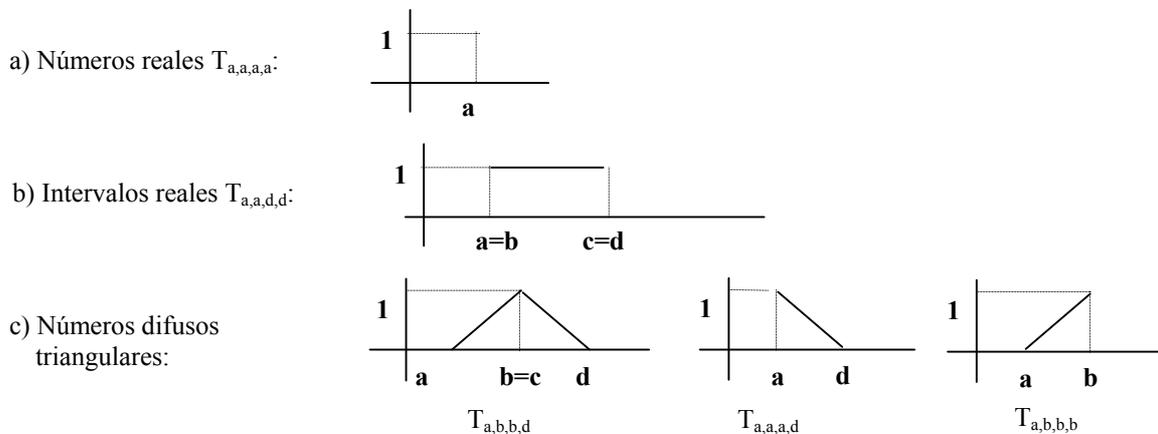


Figura 3.17. Los casos particulares de los conjuntos difusos trapezoidales

Para glosar estos conceptos con un ejemplo, baste considerar el parámetro considerado anteriormente; el plazo de ejecución de un proyecto. En una hipotética estimación de dicho parámetro, un hipotético decisor podría expresar su opinión en uno de los casos considerados, en orden de generalidad:

a) un número real o "crisp", por ejemplo 7 meses, es decir,

$$a = b = c = d = 7 \text{ meses}$$

b) un intervalo real, considerando igual de probables los valores incluidos en él, por ejemplo de 6 meses y medio a siete meses y medio, es decir,

$$a = b = 6 \text{ meses y medio} \quad c = d = 7 \text{ meses y medio}$$

- c) el mismo intervalo de variación con distintas probabilidades de los distintos valores, es decir,

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon = \text{medio mes} \quad b = c = 7 \text{ meses}$$

- d) un intervalo más probable y una frontera de menor probabilidad, por ejemplo considerando que lo más probable es que la obra tarde en ejecutarse de 6 meses y medio a siete meses y medio con un posible margen de medio mes más en cada límite, si bien con una probabilidad menor que en el intervalo previamente citado, es decir,

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \text{medio mes} \quad b = 6 \text{ meses y medio} \quad c = 7 \text{ meses y medio}$$

Obviamente este último caso correspondería a estimaciones más afinadas, en las cuales podría establecerse incluso un grado de difusión distinto en cada límite de la frontera asignando valores ε_1 y ε_2 diferentes. Obviamente este caso correspondería a situaciones muy especiales, si bien debe considerarse en aras al rigor y a la potencialidad teórica del tratamiento.

3.4.3.3. La articulación de la función del valor en el contexto difuso

La imagen de un número difuso mediante la función de valor $v(\cdot)$ definida en el apartado 3.3 de esta tesis se define del siguiente modo,

$$v(x_{a,b,c,d}) = v(x)_{v(a),v(b),v(c),v(d)} \quad (3.24.)$$

donde $v(\cdot)$ es una función de valor definida según lo descrito en el apartado 3.3. y $x_{a,b,c,d}$ un trapecio perteneciente a $\mathfrak{F}_{\mathbb{R}^+}$. Es decir, la imagen de un número difuso se obtiene mediante el cálculo de la imagen de sus respectivos parámetros a, b, c, d . En adelante se utilizarán las siguientes notaciones para hacer referencia a parámetros, x , y valores, $v(x)$, en forma de números difusos,

Parámetros (x)	$X_{a,b,c,d}$
Valores ($v(x)$)	$V_{a,b,c,d}$

Los componentes de los conjuntos difusos resultantes de calcular la imagen mediante $v(\cdot)$ estarán comprendidos entre -1 y 1, de modo que pertenecen a un subconjunto de $\mathfrak{F}_{\mathbb{R}^+}$ definido como,

$$\mathfrak{F}_{-1,1} = \{ T_{a,b,c,d} / -1 \leq a \leq b \leq c \leq d \leq 1 \} \quad (3.25.)$$

3.4.3.4. Casos de aplicación de la representación propuesta

En el contexto de esta tesis, esta representación propuesta servirá para tratar tres tipos de variables, correspondientes a dos situaciones de toma de decisión:

- a) *Toma de decisión individual*: El decisor hará una estimación de los parámetros x estimando cada uno como un número difuso. Obviamente, dependiendo del caso podrá considerar los parámetros como uno de los casos considerados anteriormente; números reales ("crisps"), intervalos reales, números difusos convencionales (representación triangular) o números difusos trapezoidales.
- b) *Toma de decisión en equipo*: Los decisores o miembros de un hipotético equipo de trabajo emiten sus estimaciones u opiniones en una de las cuatro formas consideradas anteriormente y se procede a la integración o agregación de sus opiniones de la forma que se explicará a continuación.

Por otro lado, los tipos de variables consideradas pueden ser de dos tipos: cuantitativas y cualitativas, de acuerdo a lo descrito en el apartado 3.3:

- *Cuantitativas*: corresponden a parámetros cuantitativos como los de tipo monetario, estimaciones de tiempo, parámetros físicos, etc.
- *Cualitativas*: corresponden a parámetros cualitativos como, por ejemplo, la estética, y se miden mediante puntuación. Tal como se comentaba en el apartado 3.3, también engloban a parámetros cualitativos que por condicionantes de tiempo o por la dificultad de estimación se estimen mediante puntuación.

3.4.3.5. La agregación matemática de estimaciones en un contexto de toma de decisión en equipo

El caso general

Este tipo de variables corresponde al caso de un contexto de trabajo en equipo, cuando los diversos expertos hacen una estimación en forma de intervalo o rango de valores probables. La función de pertenencia difusa sería, en el caso general, de forma trapezoidal, por lo que los conjuntos difusos correspondientes a cada estimación de los diversos parámetros x_i serían de la forma representada en la figura 3.18,

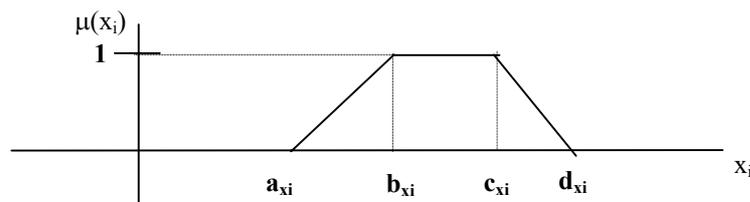


Figura 3.18. Función de pertenencia de las variables difusas cualitativas

Por tanto, tanto a nivel de los parámetros x como de sus imágenes $v(x)$ este tipo de variables adopta una serie de estimaciones en forma de trapecios (x_1, \dots, x_n) , cada uno de los cuales está determinado por cuatro valores reales $x_i \leftrightarrow (a_{xi}, b_{xi}, c_{xi}, d_{xi})$ donde $a_{xi} \leq b_{xi} \leq c_{xi} \leq d_{xi} \in \mathcal{R}$, con funciones de pertenencia de forma trapezoidal como la de la figura adjunta (figura 3.18.), con $i = 1, \dots, n$, y $n \geq 1$.

Suponiendo varias estimaciones correspondientes a los diferentes miembros del equipo, representadas como la estimación realizada por el sujeto i , su integración se realizará mediante su media aritmética y su desviación típica, tomando la envolvente de restar y sumar la desviación típica a la media, es decir, si representamos como x la variable,

$$\text{Agregación de elementos difusos} \rightarrow \text{envolvente difusa de } \{ \bar{x} - s_x, \bar{x}, \bar{x} + s_x \}$$

siendo x^T_i cada una de las estimaciones (en forma de trapecios) y s_x el trapecio definido como aquel cuyas componentes son las varianzas de las componentes de los trapecios de las estimaciones $(a_{xi}, b_{xi}, c_{xi}, d_{xi})$, es decir, $s_{x_{sa, sb, sc, sd}}$, donde s_a, s_b, s_c y s_d son las varianzas de los valores de las componentes de los trapecios de las estimaciones. Gráficamente, si se considera el trapecio x^T como un trapecio genérico T , puede visualizarse la idea mediante la figura 3.19.

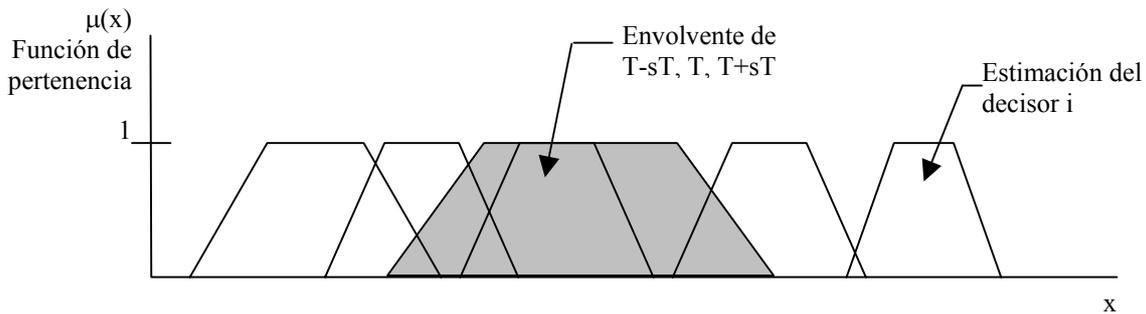


Figura 3.19. Visualización de la envolvente para la agregación de estimaciones mediante números difusos

En definitiva, se obtendrá un número difuso cuyos puntos definitorios son $(\bar{a} - s_a, \bar{b} - s_b, \bar{c} + s_c, \bar{d} + s_d)$ según se representa en la figura adjunta (Figura 3.20.):

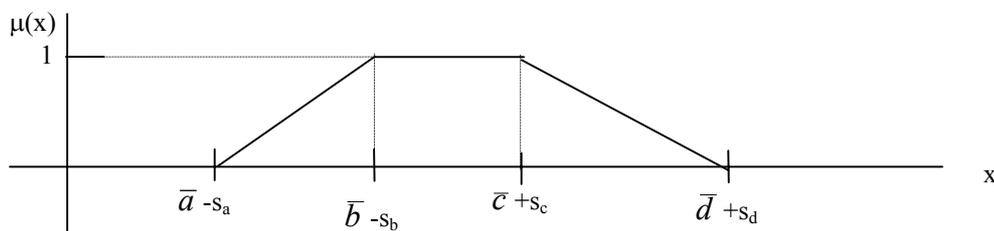


Figura 3.20. Agregación de resultados de las estimaciones

Este conjunto difuso sintetiza la información de los n valores estimados. En estas condiciones, se obtendrá su imagen mediante la función de valor $v(\cdot)$. Por tanto, el número difuso integración de las estimaciones se transforma mediante la función del valor en su imagen:

$$\begin{aligned}
 \bar{a} - s_a &\rightarrow v(\bar{a} - s_a) \\
 \bar{b} - s_b &\rightarrow v(\bar{b} - s_b) \\
 \bar{c} + s_c &\rightarrow v(\bar{c} + s_c) \\
 \bar{d} + s_d &\rightarrow v(\bar{d} + s_d)
 \end{aligned}
 \tag{3.26.}$$

Por lo que el resultado final será también un número difuso según lo descrito en la figura 3.21,

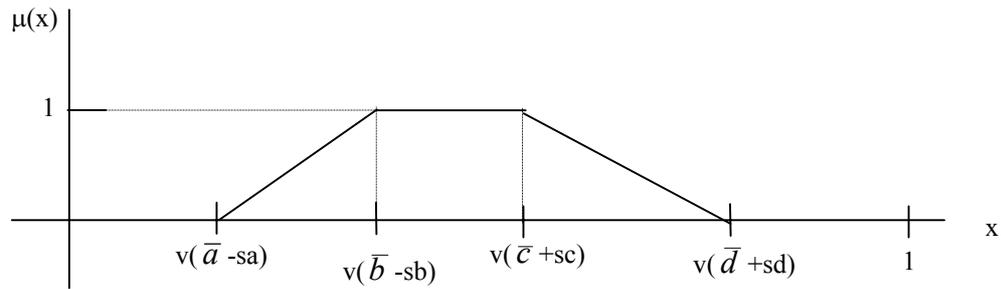


Figura 3.21. Forma del resultado del valor expresado en términos difusos

La situación de toma de decisión individual sería un caso particular de lo explicado hasta ahora, dado que el conjunto de estimaciones tendía un solo elemento.

3.4.3.6. La agregación de requerimientos en términos difusos

Obviamente lo explicado hasta aquí hace referencia a cada uno de los requerimientos contemplados, de modo que cabría plantear cómo integrar en términos difusos los diferentes valores obtenidos para cada requerimiento, en coherencia con la formulación en el apartado 3.3 (expresiones 3.5. y 3.6.).

Dado que la citada expresión es en definitiva una suma ponderada, para su estudio en el ámbito de la matemática difusa bastará considerar la expresión simple de dicho modo de agregación (expresión 3.3), es decir, una función $f: \mathfrak{G}_{-1,1} \times \dots \times \mathfrak{G}_{-1,1} \rightarrow \mathfrak{G}_{-1,1}$ que integre la información dada por las k variables con valores en $\mathfrak{G}_{-1,1}$:

$$f(v_{a_1, b_1, c_1, d_1}, \dots, v_{a_k, b_k, c_k, d_k}) = \sum_{i=1}^k k_i v_{a_i, b_i, c_i, d_i}
 \tag{3.27.}$$

donde todos los pesos k_i son números reales positivos cuya suma es la unidad, según lo explicado en el apartado 3.3 de esta tesis. La suma y producto son los usualmente utilizados en la matemática difusa y definidos en el apéndice E. En estas condiciones, se demuestra que dicha suma ponderada puede articularse mediante una operación análoga en cada uno de los componentes de los números difusos considerados, es decir,

$$\sum_{i=1}^k k_i v_{a_i, b_i, c_i, d_i} = v_{\sum_{i=1}^k k_i a_i, \sum_{i=1}^k k_i b_i, \sum_{i=1}^k k_i c_i, \sum_{i=1}^k k_i d_i}
 \tag{3.28.}$$

La demostración de esta expresión se recoge en el apéndice E (apartado E.3.). Además, en la citada demostración también se comprueba que, además, cada uno de los cuatro parámetros que determinan la suma ponderada de una colección de trapecios se encuadra entre el correspondiente mínimo y máximo de los valores iniciales. Dicha demostración se plantea en el apéndice para un número difuso cualquiera, adoptando la notación para un trapecio cualquiera como, T_{a_i, b_i, c_i, d_i} , que en el caso estudiado correspondería a los valores calculados, es decir, V_{a_i, b_i, c_i, d_i} .

Para acabar de dar rigor teórico al razonamiento, en el citado apéndice E (apartado E.5.), se incluye así mismo una justificación de la elección de la expresión de la media ponderada en términos de matemática difusa. Según puede observarse en el citado apéndice, se demuestra que dada una posible relación entre números difusos que cumpla las condiciones especificadas en este problema, esa relación deberá ser necesariamente la media ponderada. Por tanto, la elección de esta expresión frente a alternativas como el cociente (recuérdese la expresión clásica milesiana descrita en el apartado 2.3), adquiere de esta manera una coherencia teórica mayor, y reafirma los argumentos recogidos en la discusión del apéndice F sobre esta cuestión (apartado F.2.2). Finalmente cabe observar que la suma ponderada de trapecios en $\mathfrak{F}_{-1,1}$ con la suma unitaria de pesos estudiada anteriormente verifica la siguiente propiedad,

$$V_{\min\{a_i\}, \min\{b_i\}, \min\{c_i\}, \min\{d_i\}} \leq V_{\sum_{i=1}^k k_i a_i, \sum_{i=1}^k k_i b_i, \sum_{i=1}^k k_i c_i, \sum_{i=1}^k k_i d_i} \leq V_{\max\{a_i\}, \max\{b_i\}, \max\{c_i\}, \max\{d_i\}} \quad (3.29.)$$

lo cual implica que el conjunto difuso obtenido por la agregación de los diversos requerimientos está comprendido en el espectro ocupado por estos, y, por tanto, no sale de su rango de variación.

3.4.3.7. La determinación del valor más satisfactorio

Finalmente, debe tratarse un aspecto esencial en la elección según los términos propuestos: la definición de un orden en el álgebra difusa propuesta. En el conjunto de números reales, esta cuestión es trivial, pues existe y está definido un orden según el cual, por ejemplo, 4 es mayor que 2, por lo que, en coherencia, un hipotético decisor elegiría la opción que le aporta 4 a la que tan sólo le supone una ganancia de 2. En matemática difusa, sin embargo, la cuestión no es tan trivial, pues los elementos utilizados tienen un mayor grado de complejidad.

Por tanto, en aras al rigor metodológico, es necesario definir un orden según la representación adoptada. Según el razonamiento recogido en el Apéndice E (apartado E.4.), la definición del orden difuso adaptada al caso estudiado a partir del orden usual en este ámbito (Klir & Yuan, 1995) es la siguiente,

$$T_{a_1, b_1, c_1, d_1} \leq T_{a_2, b_2, c_2, d_2} \Leftrightarrow \begin{cases} a_1 \leq a_2 \\ b_1 \leq b_2 \\ c_1 \leq c_2 \\ d_1 \leq d_2 \end{cases} \quad (3.30.)$$

lo cual, tal como se visualiza en la figura 3.22, implica que el posible rango de variación del conjunto difuso de orden mayor (T_{a_1, b_1, c_1, d_1}) adquiere valores superiores al del otro conjunto difuso considerado (T_{a_2, b_2, c_2, d_2}). Esta definición de orden es intuitiva y sencilla, ya que se basa en el orden usual del conjunto de números reales (denominados “crisp” en el entorno de la matemática difusa), y de hecho supone una generalización de este, ya que si se consideran elementos difusos tales que $a=b=c=d$, el orden en \mathfrak{R} queda como caso particular del definido en el entorno difuso.

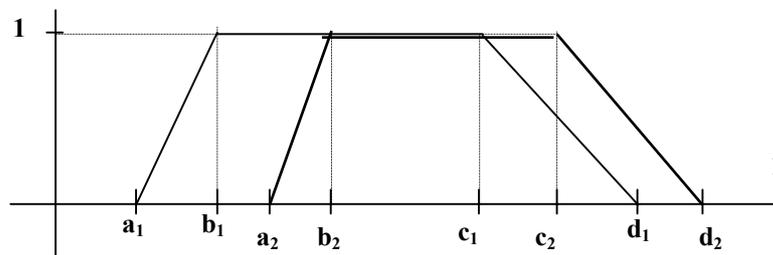


Figura 3.22. Visualización del orden difuso

3.4.3.8. Casos particulares

Para cerrar la descripción de la propuesta de esta tesis en lo relativo al tratamiento de los riesgos especulativos, cabría realizar un último análisis considerando los casos particulares de la formulación general propuesta que serán más usuales en la práctica.

a) Estimaciones como números reales (“crisp”)

Dependiendo de las condiciones en las que se desenvuelve la toma de decisión, puede juzgarse conveniente realizar las estimaciones como números reales (denominados “crisp” en el ámbito de la matemática difusa). Por ejemplo, a la hora de elegir un contratista para que ejecute una obra, puede que el coste se conozca con precisión porque ha sido cerrado con cada uno de los ofertantes previo a la toma de decisión. En este caso, simplificando las diversas componentes de la representación general propuesta, que según la notación adoptada anteriormente sería $T_{a,a,a,a}$, el resultado de la agregación de las diversas estimaciones sería de la forma descrita en la figura 3.23,

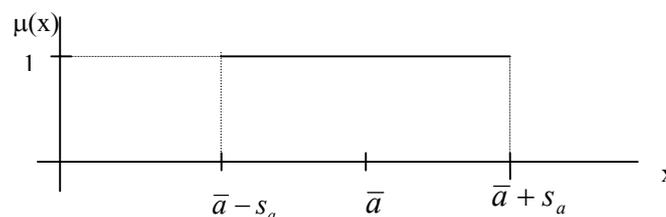


Figura 3.23. Resultado de la agregación de números reales (“crisp”)

donde \bar{a} es la media y s_a la desviación estándar de los valores obtenidos. Es interesante observar la correspondencia de este resultado con la intuición, dado que la agregación de un conjunto de números reales da lugar a un intervalo.

b) Estimación mediante intervalos reales

Otro de los casos a estudiar es el correspondiente a la situación en la que se decida realizar la estimación mediante intervalos reales. En este caso, cada una de las estimaciones sería un conjunto difuso de forma rectangular, pues se asume que los valores comprendidos en el citado intervalo son igualmente probables. Siguiendo el ejemplo anterior, el coste se estimaría mediante un intervalo de números reales (por ejemplo, entre 270 y 280.000 euros). Mediante un razonamiento similar al anterior se deduce fácilmente que la integración de este caso particular de números difusos daría lugar a un elemento similar al de la figura 3.24,

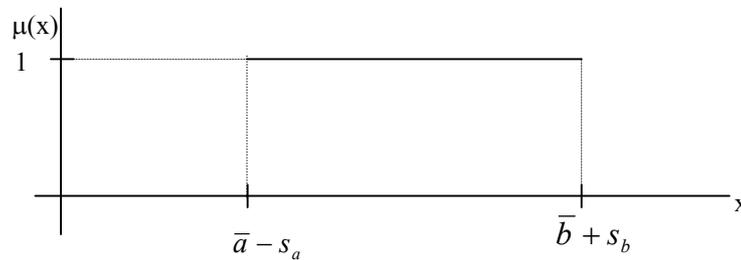


Figura 3.24. Resultado de la agregación de intervalos reales

siendo a y b los extremos de los intervalos considerados y \bar{a} , \bar{b} , s_a y s_b sus medias y desviaciones típicas. La representación del conjunto difuso según la representación adoptada sería $T_{\bar{a}, \bar{b}}$. En definitiva, la agregación de intervalos reales da lugar a otro intervalo real.

c) Estimación mediante números difusos triangulares

Otro de los posibles modos de estimación que ofrece el tratamiento propuesto es aproximar el resultado mediante un intervalo en el cual, a diferencia del caso anterior, se considera que los valores centrales son los más probables. Ello daría lugar a conjuntos difusos triangulares, de la forma $T_{\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}}$, cuya agregación da lugar a un trapecio de la forma descrita en la figura 3.25,

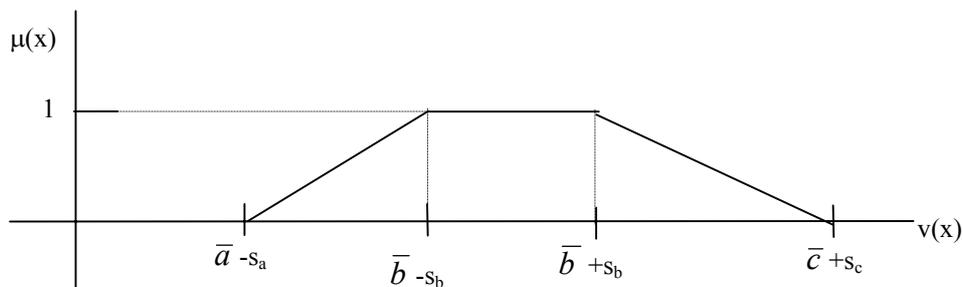


Figura 3.25. Resultado de la agregación de números difusos triangulares

donde a , b y c son los números que definen el triángulo correspondiente al número difuso considerado y s_a , s_b y s_c sus desviaciones típicas. En resumen, la agregación de números difusos da lugar a un conjunto difuso de forma trapezoidal.

d) *Distinción entre variables cualitativas y cuantitativas*

De lo descrito en este apartado se deduce que, desde el punto de vista de su tratamiento matemático, no se hace ninguna distinción entre variables cuantitativas y cualitativas, dado que, al cuantificar las variables cualitativas como puntuaciones, para la maquinaria matemática propuesta son simples números iguales que los costes, los tiempos, etc. Obviamente, a efectos prácticos la estimación cualitativa puede realizarse de cualquiera de los cuatro modos definidos anteriormente (números “crisp”, intervalos, triángulos o trapecios), si bien lo más razonable será articularlos mediante números reales sencillos (“crisp”) o como mucho intervalos reales si el decisor tiene dudas entre asignar una puntuación u otra.

3.4.4. El tratamiento de los riesgos puros

3.4.4.1. El concepto de riesgo puro y sus elementos

En coherencia con la definición del riesgo propuesta en el apartado 3.4.2. y como desarrollo de esta, a continuación se propone una modelización del concepto de riesgo puro según el esquema de la figura 3.26. En ella quedan reflejados sus diferentes elementos que servirán de base para articular la presente propuesta de tratamiento. Respecto a las palabras utilizadas cabe comentar que no se pretende entrar en controversias semánticas, sino simplemente proporcionar un esquema de análisis del concepto, por lo que los términos escogidos se dejan abiertos a posibles cambios, en caso de verse conveniente.

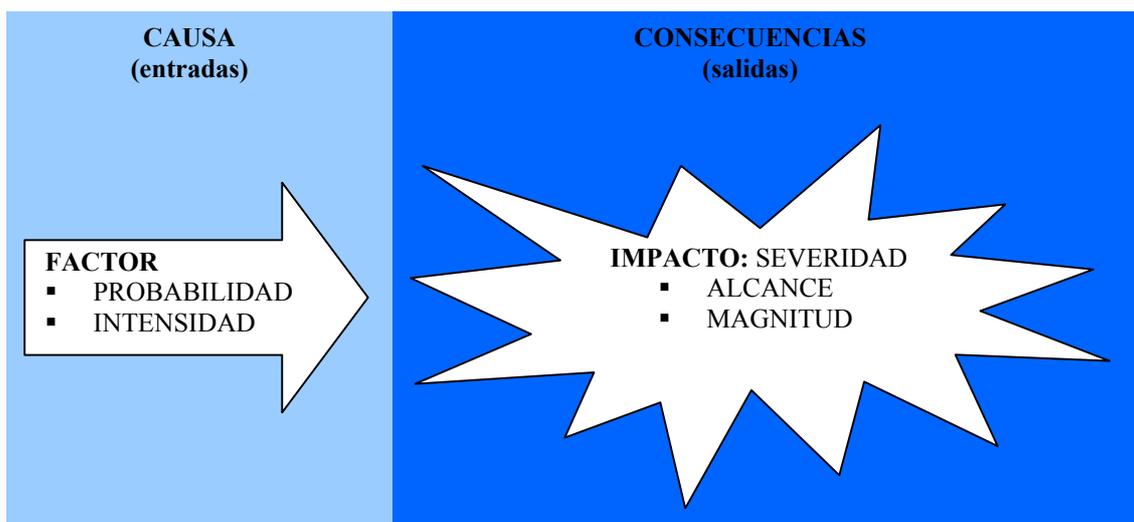


Figura 3.26. Esquema de estudio de los componentes del concepto de riesgo puro

En la figura anterior se observa que el concepto de riesgo puro comprende, en primer lugar, un *factor* de incidencia (por ejemplo, la aparición de fuego, lluvias torrenciales, etc.), el cual supone una entrada en el sistema considerado y es la *causa* de las posteriores consecuencias sobre el mismo. Este factor implica una *probabilidad* de ocurrencia, expresada como frecuencia o como periodo de retorno, y una *intensidad*, de modo que, por ejemplo, puede establecerse una comparación entre diversos fenómenos de lluvias extraordinarias en función de los litros caídos por metro cuadrado. Asimismo, no es lo mismo un oleaje de 7 m de altura que un maremoto de olas de 15 m.

Por otro lado, la incidencia del factor de riesgo que entra en el sistema produce unas salidas o *consecuencias*, a las que se les ha denominado *impacto* del factor de riesgo. Este impacto se medirá mediante la *severidad* del riesgo, que a su vez comprende dos elementos: el alcance y la magnitud. En primer lugar, el alcance describe la extensión alcanzada por el factor de riesgo. Así, por ejemplo, un incendio podría tener diferente alcance dependiendo de la parte del edificio donde se produce, los materiales de este, la hora del día en la que se produce, etc. Asimismo, un corrimiento de tierras puede afectar a una zona más o menos extensa. A efectos de lo descrito en apartados precedentes, el alcance del factor de riesgo se determinará identificando los requerimientos a los que afecta. Por otro lado, la afectación puede tener una *magnitud* variable, de modo que, por ejemplo, podría darse el caso de que un cierto factor de riesgo tuviese un alcance reducido (un corrimiento de tierras que afecte a pocos edificios) pero una gran magnitud (si esos edificios tienen un gran valor, si se producen muchas víctimas, etc.). En coherencia con la formulación del valor expuesta en apartados anteriores, la intensidad del riesgo se medirá a través de los parámetros de respuesta a los requerimientos planteados. Así, por ejemplo, la magnitud del impacto de un oleaje en un puerto se medirá en pérdidas económicas (que en definitiva es un sobre coste de la infraestructura en fase de explotación), en pérdidas humanas, etc.

En base a esta modelización del riesgo puro, se describirá a continuación el modo de cuantificación de sus elementos propuesto en esta tesis.

3.4.4.2. La cuantificación de los riesgos puros

La cuantificación de la intensidad y la probabilidad

La probabilidad del riesgo y la intensidad del mismo son dos elementos íntimamente asociados. Por ejemplo, baste pensar en un caudal de avenida en un cierto cauce; una caudal de una intensidad elevada estará asociado a una probabilidad de ocurrencia¹⁷ baja y al revés. Ambas variables se fijarán según los desarrollos teóricos al respecto (e.g. Casteleiro, 1986), a partir de datos históricos o mediante estimación.

La cuantificación de la severidad del riesgo (la magnitud y el alcance)

La propuesta de esta tesis para la evaluación de la severidad del riesgo parte de la definición y formulación del valor introducida en el apartado 3.3 (expresiones 3.5. y

¹⁷ La probabilidad de ocurrencia puede definirse en el caso de los riesgos puros como la frecuencia o el inverso del periodo de retorno T.

anteriormente. La formulación matemática de la severidad adopta, por tanto, una forma similar a la propuesta anteriormente para el concepto del valor,

$$S = \sum_{i=1}^{n1} k_{1i}^1 \cdot \left(\sum_{i_2=1}^{n2} k_{i_2}^2 \cdot \dots \left(\sum_{i_m=1}^{n_m} k_{i_m}^m \cdot s_{i_m}^m(x_1^{i_m}, x_2^{i_m}, \dots, x_l^{i_m}) \dots \right) \right) \quad (3.33.)$$

$$s_{i_m}^m(x_1^{i_m}, x_2^{i_m}, \dots, x_l^{i_m}) = \sum_{k=1}^{n_m} s_{i_m}^m(x_k^{i_m}) \quad (3.34.)$$

donde s es la severidad, $k_{i(m)}$ los pesos de los (sub)requerimientos y $s_{i(m)}(x_1, \dots, x_n)$ son las funciones de severidad de los diversos requerimientos. Es importante observar a este respecto que esta formulación de los riesgos puros lleva implícitos riesgos de tipo especulativo en la incertidumbre acerca del valor de los parámetros. Es decir, de forma análoga a lo explicado anteriormente acerca de la integración de este último tipo de riesgos en la definición del valor, la definición propuesta de la severidad, al ser paralela a la del valor, comporta una integración idéntica de la incertidumbre acerca de los resultados.

El alcance del riesgo queda determinado por los requerimientos en los que influye el factor considerado. Por ejemplo, el riesgo de retraso en la entrega de materiales por parte de un suministrador tiene un alcance que comprende dos requerimientos: los relativos al tiempo de ejecución y al coste de construcción (dado que la mano de obra queda inactiva durante la espera). El riesgo de incendio, sin embargo, tiene un alcance superior, ya que además de afectar a los dos requerimientos anteriores, abarca otros relativos a los posibles daños humanos y al medioambiente.

Por otro lado, el valor de $s(y, x_0)$ supone una medida cuantitativa la magnitud del riesgo, de modo que, al hilo del ejemplo anterior, dependiendo de su intensidad un incendio pequeño podría tener una magnitud menor que un retraso importante. Baste considerar al respecto el caso de que el retraso sea de varias semanas y el material suministrado tenga un papel crítico en la planificación de los trabajos de ejecución.

Finalmente es importante observar que la severidad calculada está asociada a una cierta probabilidad de ocurrencia y una intensidad asociada del riesgo. Por ejemplo, la severidad estimada del riesgo de daño por oleaje estará asociada a un cierto periodo de retorno (probabilidad) que a su vez determina una altura determinada de oleaje (intensidad del riesgo) con la que se determinará la severidad del riesgo estudiado.

3.5. EL PROCESO “ACE” DE TOMA DE DECISIÓN

3.5.1. Descripción general del proceso

En los apartados precedentes se ha introducido una definición y un tratamiento matemático de los conceptos de valor y riesgo. En este apartado se introduce la propuesta de un proceso de toma de decisión como articulación metodológica de ambos elementos teóricos, los cuales, según se explicaba al inicio del capítulo (ver figura 3.1), le sirven de fundamento. De hecho, dicho proceso pretende constituir una metodología para la toma de decisión, mediante un procedimiento estructurado en tres fases: análisis (A), creatividad (C) y evaluación (E), resumidas en el acrónimo ACE. En la figura 3.28 se recoge el esquema de este proceso, cuyo desarrollo constituye el contenido de este apartado.

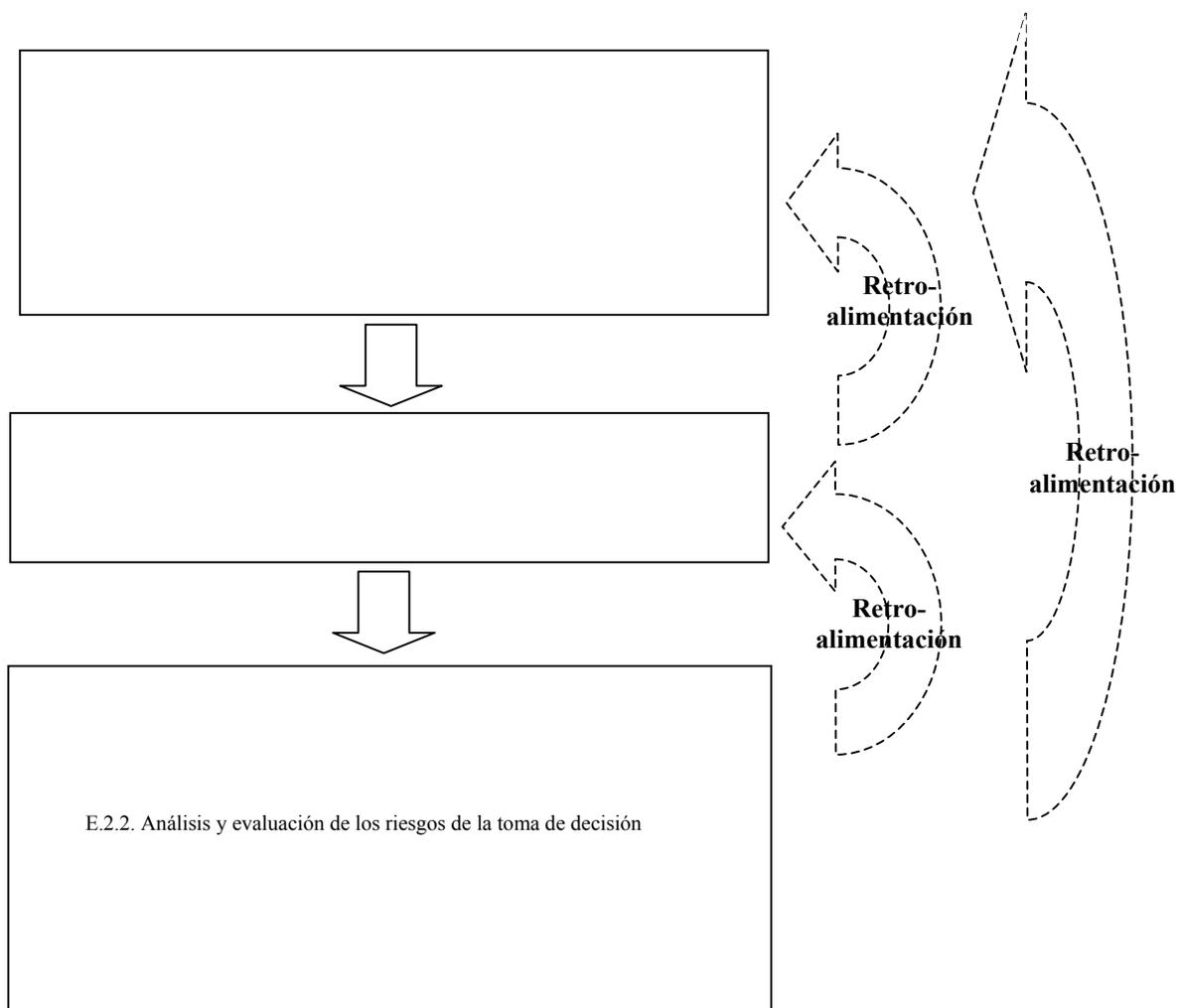


Figura 3.28. Esquema del proceso ACE

Según se observa en la figura, cada una de las etapas o fases consideradas engloba un conjunto de actividades que concretan el proceso metodológico. A nivel general, cabe observar que la primera de las etapas propuestas supone un análisis donde se estructura el problema y se fijan los requerimientos que definirán el valor en el contexto considerado. Posteriormente se introduce una fase de creatividad, donde se generan las

ideas a aplicar en los distintos puntos de decisión y que serán juzgadas posteriormente en la etapa de evaluación, donde tendrá lugar propiamente toma de decisión al elegir la alternativa a adoptar en cada caso.

En un primer análisis puede deducirse que una característica importante del modelo es su carácter iterativo, lo cual implica que en cualquier punto será posible y convendrá retroceder en el proceso de la metodología para la revisión de aspectos anteriores. Esto implica que, por ejemplo, el árbol de requerimientos planteado es susceptible de modificaciones y actualizaciones a lo largo de todo el proceso, de la misma manera que, ya en la fase de evaluación de alternativas, puede aplicarse la creatividad para volver a generar ideas no planteadas en un principio. Tiene, por tanto, carácter iterativo y cíclico. Esta característica se intenta representar en la figura anterior mediante unas flechas discontinuas que indican revisión o retroalimentación (feedback) mediante el retroceso a puntos anteriores del ciclo. Una vez más se intenta con este diseño dotar de flexibilidad y dinamismo al modelo y evitar así compartimentos estancos.

Respecto a las aportaciones precedentes, recogidas al tratar el problema de la toma de decisión en el apartado 2.2 del estado del conocimiento y en el Apéndice B de esta tesis, este proceso supone, en primer lugar, una simplificación metodológica, ya que consta únicamente de tres etapas bien diferenciadas. Por otro lado, intenta conciliar el rigor teórico y la posibilidad de objetivizar y cuantificar todo aquello que sea objetivizable y cuantificable, con la parte intangible y cualitativa de toda toma de decisión, que implica necesariamente un cierto grado de flexibilidad y dinamismo. Asimismo, aporta un tejido de conceptos y herramientas matemáticas engarzadas de forma unitaria y que intentan constituir un procedimiento compacto que cubra todas las vertientes del problema, y no sólo aspectos aislados.

Finalmente, es interesante destacar que, al encuadrarse en el paradigma integrador, el proceso ACE aquí propuesto permite su adaptación en circunstancias de muy diversa índole. Así, por ejemplo, sería aplicable tanto en una decisión de carácter individual como en un estudio realizado por un equipo o grupo de personas. Asimismo, sería aplicable en el contexto de decisiones acerca de realidades muy dispares, si bien está enfocado principalmente para su uso en proyectos y organizaciones de todo tipo. Esta adaptabilidad y diversidad de aplicación hace que la descripción de sus fases sea necesariamente general, pero no por ello carente de rigor y estructuración.

3.5.2. La fase de análisis

La función de la fase de análisis es estudiar el marco del problema y fijar una estructura que servirá de base para las posteriores fases de creatividad y evaluación. Por ejemplo, en el caso de la gestión de proyectos constructivos, esta fase acometería un análisis general del proyecto, sin entrar todavía en los posibles puntos de decisión. Los pasos englobados en esta fase y que se desarrollarán a continuación son los recogidos en la figura 3.28.

A.1. Preparación del estudio y recopilación de información

Esta etapa incluye las tareas previas relativas al equipo de trabajo y a la recogida de la información necesaria para llevarlo a cabo. Cada toma de decisión requerirá unos ciertos procedimientos al respecto que deberán ser particularizados en cada caso según la realidad considerada. Por ejemplo, en el caso de la aplicación del proceso ACE en el contexto de una decisión relativa a un proyecto constructivo, esta etapa comprendería la búsqueda de información sobre el proyecto desde el punto de vista urbanístico, geotécnico, medioambiental, socio-político, etc. Por otro lado, englobaría también la organización del eventual grupo de trabajo para analizar las diversas alternativas y proponer una solución: elección de los integrantes, planificación del trabajo, etc.

A.2. Identificación de procesos: construcción de la matriz de procesos

A continuación se identificarán los procesos relacionados con la realidad en estudio; por ejemplo, los del proyecto o la organización en los que se enmarca la toma de decisión. Se identificarán a partir de la denominada “matriz de procesos”, cuya estructura se articula en torno al marco de referencia y a tres tipos de procesos (AENOR, 2000);

- *Procesos clave*: son aquellos que forman la cadena básica de operaciones.
- *Procesos estratégicos*: son aquellos que coordinan y dirigen el resto de procesos
- *Procesos de soporte*: son aquellos que permiten la realización de los procesos clave.

Obviamente el marco de referencia será diferente si la toma de decisión analizada está en el contexto de un proyecto, de una organización, etc. Por tanto, dicha matriz adoptará la forma descrita en la tabla 3.5.

	MARCO DE REFERENCIA
<i>PROCESOS ESTRATÉGICOS</i>	Proceso 1
	Proceso i
<i>PROCESOS CLAVE</i>	Proceso i+1
	Proceso j
<i>PROCESOS DE SOPORTE</i>	Proceso j+1
	Proceso n

Tabla 3.5. Matriz de procesos genérica

A.3. Construcción de la matriz de requerimientos

Los requerimientos se identificarán a partir de la denominada “matriz de requerimientos”, cuya estructura se articula en torno al marco de referencia y a los planos de estudio considerados. Por tanto, dicha matriz adoptará la forma descrita en la tabla 3.6.

	MARCO DE REFERENCIA
<i>Plano de estudio 1</i>	Requerimiento 1 Requerimiento i
...	Requerimiento i+1 Subrequerimiento i+1,1 ... Subrequerimiento i+1,k Requerimiento j
<i>Plano de estudio n</i>	Requerimiento j+1 Requerimiento n

Tabla 3.6. Matriz de requerimientos genérica

A.4. Ponderación y asignación de pesos

Los requerimientos identificados se ponderarán en función de su importancia o peso específico en el valor del proyecto. Para ello se utilizará el proceso CIP, propuesto en esta tesis y descrito en el apartado 3.3. de este capítulo, según el cual se construirá una matriz de comparación de requerimientos en base a la cual se extraerán los pesos normalizados.

A.5. Construcción del árbol de requerimientos

Según lo definido en el capítulo anterior, se construirá un árbol con base en los requerimientos previamente identificados, desplegándolos en otros de orden inferior según el grado de detalle al que se quiera realizar la evaluación. Este árbol constituirá la estructura de análisis del problema.

3.5.3. La fase de creatividad o generación de alternativas

El objetivo de la fase de creatividad es buscar puntos de mejora de la realidad analizada y generar alternativas en cada uno de ellos, las cuales serán evaluadas posteriormente en la fase de evaluación. Todo ello, partiendo del análisis realizado en la etapa anterior. Por ejemplo, en el caso de un proyecto constructivo, esta fase abarcaría la búsqueda de posibles puntos de mejora mediante cambios geométricos, de tipología constructiva, etc. y la generación de alternativas en cada uno de ellos. Dependiendo del contexto del estudio planteado, esta fase de creatividad puede ser realizada por un grupo de trabajo (en el caso de una toma de decisión en grupo) o por una sola persona (en una toma de decisión individual).

C.1. Identificación de puntos de decisión

Según se ha comentado, un primer paso previo a la generación de alternativas es la identificación de puntos de mejora del valor de la realidad considerada. Sobre estos puntos de mejora se generarán de alternativas sobre las que habrá que tomar una decisión con relación a cuál adoptar. Como es lógico, en el caso de que exista un único

punto de decisión, este paso puede obviarse. También será superfluo si los puntos de decisión estaban fijados previo al desarrollo del estudio. Sin embargo, en una hipotética aplicación del proceso ACE en el contexto de un análisis más amplio donde se pretendan introducir mejoras en una cierta organización o proyecto, este punto tendrá una importancia crucial, pues supondrá identificar los aspectos de mejora o innovación que constituirán los puntos de toma de decisión en torno a los que se generarán las alternativas.

Esta identificación de los puntos de decisión puede incluir una evaluación cualitativa de la trascendencia de los mismos, basada en la observación del número y el peso de los requerimientos del árbol anteriormente mencionado a los que afecta (paso A.5 del proceso ACE). Mediante este breve ejercicio podrá estimarse el alcance del punto de decisión considerado, y si merece la pena o no detenerse en su estudio (es decir, seguir el desarrollo del proceso ACE).

C.2. Generación de alternativas para cada punto de decisión

En los puntos de decisión identificados anteriormente en la etapa C.1. se procederá a la generación de alternativas para la toma de decisión considerada. La naturaleza de estos puntos de decisión es muy variable según el caso. Por ejemplo, en la gestión de proyectos constructivos, según el momento del ciclo de vida donde se realice el estudio de valor, estos puntos de toma de decisión serán referentes al diseño básico, a soluciones tecnológicas para la definición en detalle, a los métodos constructivos para la ejecución, etc.

En torno a los puntos de decisión fijados se procederá a la generación de alternativas para cada uno de ellos. Para ello serán aplicables todas las técnicas de creatividad existentes hoy en día (véanse, por ejemplo, las recogidas en el apéndice I), siempre y cuando, como es lógico, se amolden a las características deseadas para el estudio. En cualquier caso, la utilización de una u otra metodología en este sentido queda como una cuestión totalmente abierta.

Finalmente, es interesante observar que la estructuración del problema introducida en la fase de análisis mediante el árbol de requerimientos ayuda a la creatividad en el sentido de que la estructura y la orienta, es decir, pretende encauzar el potencial creativo humano direccionándolo y apoyándolo con los elementos que requiere.

3.5.3. La fase de evaluación

En esta última fase de evaluación (recuérdese el esquema de la figura 3.28) se procede a sopesar el valor de cada una de las alternativas generadas en torno a los puntos de decisión considerados. Esta evaluación se basará en el cálculo del valor de cada una de ellas teniendo en cuenta la incertidumbre asociada al conocimiento imperfecto de algunos de sus parámetros (riesgos especulativos) o a la posible influencia de factores externos que impliquen una posible variación importante del resultado esperado. En definitiva, consiste en sopesar el valor y el riesgo inherente a cada una de ellas. A este respecto debe comentarse también que, dependiendo de los condicionantes del estudio, esta evaluación puede ser numérica o bien puede llevarse a

cabo de forma cualitativa, sin realizar las operaciones matemáticas descritas en los apartados precedentes.

E.1. Preselección de cualitativa de alternativas para cada punto de decisión

Dado el gran número de alternativas que pueden surgir de la fase de creatividad, sobre todo en el caso de realizarse en un contexto de trabajo en equipo, será necesaria una primera criba de las ideas surgidas. Una evaluación sistemática de todas ellas sería algo inabarcable o demasiado pesado, por lo que deberán ser desechadas de forma cualitativa todas aquellas que se juzguen menos provechosas. Para ello pueden utilizarse diversos procedimientos, según el caso. Por ejemplo, puede realizarse mediante una evaluación cualitativa en vistas al árbol de requerimientos construido, sopesando cualitativamente el valor y el riesgo de las diversas alternativas. Asimismo, pueden utilizarse otro tipo de métodos, como el uso de técnicas sencillas de evaluación.

E.2. Evaluación de alternativas para cada punto de decisión

Tras la preselección se procederá a la evaluación de las alternativas escogidas, para lo cual se calcula su valor según la formulación introducida en el apartado 3.3 y la evaluación de los riesgos descrita en el apartado 3.4. En definitiva, se distinguirán las siguientes subfases:

E.2.1. Evaluación del valor de cada alternativa sin considerar los riesgos puros

Cada alternativa será evaluada con base al árbol de requerimientos construido anteriormente, desplegándolo según se crea conveniente y adoptando los parámetros de respuesta necesarios para describir el grado de satisfacción de los requerimientos a los que afecta la toma de decisión, según el aparato matemático descrito en los apartados 3.3 y 3.4. Dicha evaluación no tendrá en cuenta los riesgos puros, cuyo efecto se introducirá posteriormente, en la etapa E.2.2. Así, por ejemplo, al considerar dos alternativas de tipología constructiva para la estructura de un edificio, el concepto de valor sin riesgo englobaría el rango de posibles costes de construcción (en el caso más general con las correspondientes probabilidades anejas), plazo de construcción, etc, pero no consideraría la pérdida de valor que podría inducir un riesgo como el de corrosión o incendio, cuyo efecto se traducirá en una variación de los valores de ciertos parámetros como el coste de reparación.

A pesar de no contemplar el efecto de los riesgos puros, esta evaluación del valor tiene en cuenta el riesgo especulativo, ya que la evaluación de los parámetros de respuesta se llevará a cabo mediante el tratamiento a través de matemática difusa descrita en el apartado 3.4 de esta tesis. Por tanto, el valor obtenido en esta fase del proceso será un conjunto difuso de forma trapezoidal que describirá el grado de imprecisión en el conocimiento de los resultados.

E.2.2. Análisis y evaluación de los riesgos de la toma de decisión

Una vez calculado el valor sin riesgo de cada alternativa se integrará el efecto de los riesgos puros de la siguiente manera:

- i) En primer lugar se identificarán los riesgos puros relacionados con la toma de decisión, tanto riesgos del exterior sobre el proyecto como viceversa.
- ii) Así mismo, se le asociará a cada riesgo una probabilidad, con la que se determinará su intensidad.
- iii) Se procederá a la construcción de un árbol de impactos del riesgo en cuestión, donde quedarán reflejados de forma lógica sus consecuencias. Los extremos del árbol de impactos serán parámetros de medición, a estimar por el decisor.
- iv) Se calculará la severidad del riesgo considerado mediante la integración de los impactos medidos en el árbol de decisión. Para ello, se evaluará el efecto de estos riesgos mediante la formulación introducida en el apartado 3.4. de esta tesis, de la que se extraerá una severidad (expresada como un conjunto difuso de forma trapezoidal), que expresa la posible pérdida de valor derivada de ese riesgo puro

E.2.3. Cálculo del valor integrado de cada alternativa

Una vez calculado el valor de la alternativa en cuestión, sin considerar los riesgos puros. A este valor se le denominará v^* . Posteriormente, se calculará el valor integrado, de modo que contemple el efecto de los riesgos puros. Este cálculo se articulará para cada alternativa según la siguiente expresión:

$$v = v^* - s \quad (3.35.)$$

donde “s” es la severidad de la integración de los riesgos puros que influyen en la toma de decisión considerada. De la anterior definición se deduce de forma directa que si v menor o igual que cero, la alternativa considerada no es viable, ya que produce insatisfacción o una satisfacción nula. Es decir,

$$A \text{ es viable} \Leftrightarrow v > 0 \quad (3.36.)$$

El cálculo de la severidad de los distintos riesgos a la que se hacía referencia anteriormente, “s”, se lleva a cabo a partir de las severidades (s_i) de los riesgos puros considerados. Para ello, de cara a ensamblar el efecto de los diferentes factores de influencia, es preciso considerar la simultaneidad de ocurrencia y su interdependencia. Por tanto, será necesario considerar tanto el efecto de todos los posibles riesgos que intervengan como las consecuencias de todas sus posibles combinaciones, todo ello en términos de severidad para lograr una homogeneización de medida que permita operar de forma coherente y unitaria.

A estos efectos, se considerará el solape de riesgos como un nuevo riesgo, diferenciado de los riesgos simples cuya confluencia le da origen, ya que al no existir linealidad su efecto deberá ser estimado de nuevo. Podría expresarse esta idea de forma matemática considerando que si R_1, \dots, R_n son los posibles riesgos que intervienen en una cierta toma de decisión, sus posibles combinaciones binarias serían,

$$\begin{aligned}
& R_1 \cap R_2, \dots, R_1 \cap R_n \\
& \dots \\
& R_{n-1} \cap R_n
\end{aligned} \tag{3.37}$$

Sin embargo, estas combinaciones no tienen por qué restringirse a dos elementos, sino que podrán ser originadas por la simultaneidad de tres, cuatro y hasta n riesgos, correspondiente al caso de que todos los riesgos considerados se den a la vez. Obviamente, en la práctica la mayoría de estas simultaneidades serán despreciables, entre otras cosas porque, en caso de independencia, la probabilidad de la intersección de sucesos es la probabilidad producto, con lo cual esta sería muy próxima a cero. Sin embargo, desde un punto de vista teórico de máxima generalidad, debería considerarse el efecto de todos los riesgos y todas las posibles combinaciones, de manera que el efecto total sería la unión entre todos estos sucesos,

$$(\text{ningún riesgo}) \cup R_1 \cup R_2, \dots, \cup R_n \cup (R_1 \cap R_2) \cup \dots \cup (R_1 \cap \dots \cap R_n) \tag{3.38}$$

Por tanto, el espectro total de ocurrencia considerado estaría compuesto por los sucesos correspondientes a la ocurrencia de cada uno de los riesgos (sin que se dé el resto), sus intersecciones y el sucesos correspondiente a que no se dé ninguno de los riesgos identificados.

El cálculo de la severidad global (s), es decir, la unión de todos los posibles sucesos anteriormente comentados, en situaciones similares se plantea a veces tomado el máximo de los valores considerados (e.g. Tah et al, 2000). Sin embargo, en este caso se tomará el valor esperado, es decir,

$$s = P_{R_1} \cdot S_{R_1} + \dots + P_{R_n} \cdot S_{R_n} + P_{R_1 \cap R_2} \cdot S_{R_1 \cap R_2} + \dots + P_{R_1 \cap R_2 \cap \dots \cap R_n} \cdot S_{R_1 \cap R_2 \cap \dots \cap R_n} \tag{3.39}$$

La razón de adoptar el valor esperado, aún siendo consciente de sus limitaciones, es que se ha considerado el modo de integración más sencillo e intuitivo, así como el más extendido en la práctica. Respecto al uso del criterio del máximo o de otros modos de integración para situaciones similares (los cuales se recogen en el apéndice D), el criterio del valor esperado se considera que refleja más fielmente la diversidad de posibles resultados. El uso de la probabilidad es en este caso ineludible. Matemáticamente esta operación sería un sumatorio de productos entre escalares y conjuntos difusos de forma trapezoidal, lo cual es una operación matemática definida en el apéndice E.

Finalmente cabría preguntarse si el valor resultante de v estará restringido al intervalo $(-1,1)$, es decir, si podría darse una severidad tal que $v < -1$. Obviamente, para que el método sea consistente, v ha de estar restringido entre -1 y 1 , ya que de lo contrario carecería de sentido, dado que el grado de (in)satisfacción ha sido definido en estos valores. Para demostrar que v pertenecerá a dicho intervalo, basta partir de la definición conceptual de la severidad como pérdida de valor. De ello se deduce que, por grande y devastadoras que sean las consecuencias del riesgo puro o del conjunto de ellos, no puede perderse más de lo que ya había. Matemáticamente podría puede

demostrarse esta idea partiendo de la definición de función de severidad propuesta (expresión 3.31). Atendiendo a esta expresión, la integral del efecto de todos los riesgos no puede ser mayor que la diferencia entre el valor inicial y -1 , pues la formulación no lo permite.

Para visualizar esta idea con un ejemplo, basta considerar un conjunto de riesgos cuya alta probabilidad y terribles efectos supongan una ruina total del proyecto prácticamente segura (es decir, con una probabilidad que pudiese considerarse 1). En este caso, considerando únicamente el factor económico, su efecto conjunto no puede ser mayor que el coste del proyecto, ya que no puede perderse más de lo que había.

E.2.4. Análisis de compatibilidad

Una de las objeciones a las que podría estar expuesto el proceso ACE, tal como está planteado, radica en la falta de conexión entre las diferentes tomas de decisión. Esta carencia es común en toda la teoría de toma de decisiones, ya que los modelos propuestos han sido tradicionalmente dirigidos al análisis de decisiones aisladas, y por lo tanto faltaría una ligación o marco común en el caso de que exista relación entre ellas. En este sentido, para acabar de dar coherencia interna al sistema faltaría incorporar un vínculo más de relación entre las diferentes tomas de decisión que plasme la compatibilidad de las mismas.

Para estimar la trascendencia de esta cuestión, basta pensar en dos hipotéticos puntos de toma de decisión donde las alternativas escogidas, según la metodología de evaluación planteada, sean incompatibles. Pensemos, por ejemplo, en dos tomas de decisión sobre la geometría de un edificio y la correspondiente a la elección de cierta tipología constructiva, por ejemplo de estructura, cubierta o fachada. Es sabido que las tipologías constructivas no admiten cualquier geometría, sino que tienen diversas limitaciones, por lo que existen posibles incompatibilidades¹⁸. Idéntico razonamiento es aplicable a los aspectos urbanísticos o de legislación en general.

Para la articulación matemática de esta cuestión se propone la inclusión de un coeficiente de compatibilidad, definido de la siguiente manera,

$$v' = v - c \quad (3.40.)$$

$$c = \phi \cdot k$$

$$k = \begin{cases} 0 & \text{si } \exists \text{ incompatibilidad} \\ 1 & \text{si } \exists \text{ compatibilidad} \end{cases}$$

¹⁸

Por ejemplo, las cubiertas de evacuación requieren un mínimo de pendiente, así que la geometría del edificio y la elección del tipo de cubierta deben estar coordinadas, es decir, deben ser coherentes o compatibles

$$\phi = \begin{cases} \text{insalvable} \Rightarrow \phi = \begin{cases} v > 0 & \phi = v + 1 \\ v < 0 & \phi = v - 1 \end{cases} \\ \text{salvable} \Rightarrow \phi \equiv s \end{cases}$$

donde v' es la modificación del valor calculado anteriormente (una vez considerados los riesgos puros) teniendo en cuenta el efecto de sus posibles incompatibilidades, totales o parciales. Es decir, observando la expresión anterior cabe deducir que si no existe incompatibilidad, el resultado no se altera. Por otro lado, si hay una incompatibilidad insalvable, el coeficiente fuerza a la máxima inviabilidad del resultado, mientras que si puede remediarse, deberá evaluarse de manera análoga a la descrita al tratar de los riesgos puros (mediante una función de severidad “s”), de cara a evaluar el “coste” (en sentido amplio) de salvar la incompatibilidad, mediante una medición del sobrecoste, retraso, pérdida de calidad, etc. que comporta tomar las medidas necesarias.

E.2.5. Análisis de los resultados

E.2.5.1. Cálculo del índice de potencialidad y eficacia de la alternativa

Para describir la importancia y la eficacia de la alternativa considerada, se proponen cuatro indicadores, a determinar en cada una de las alternativas. Estos indicadores son:

Potencialidad de valor (PV): es el resultado del cálculo de v^* con todas las funciones de valor relativas a los requerimientos a los que afecta la decisión con valor 1, es decir, con una satisfacción máxima. Obviamente será un número real (o “crisp”)

Potencialidad de riesgo (PR): es el resultado del cálculo del sumatorio de las severidades de los requerimientos afectados (s_i) con valor 1, es decir, la máxima pérdida de valor posible.

Eficacia de valor (EV): es el porcentaje de valor conseguido con respecto a la potencialidad de valor o alcance en valor de la alternativa.

$$EV = \frac{v^*}{PV} \cdot 100 \quad (3.41.)$$

Eficacia de riesgo (ER): es el porcentaje de riesgo evitado con respecto a la potencialidad de riesgo o alcance en riesgo de la alternativa.

$$ER = \frac{s}{PV} \cdot 100 \quad (3.42.)$$

siendo s es la severidad integrada de los riesgos considerados.

La misión de estos indicadores es aportar al decisor información complementaria que le ayude a retroalimentar el proceso de decisión y a enfocar con mayor detalle la elección final.

E.2.5.2. *Análisis de sensibilidad*

Una vez realizada la evaluación, se realizará un análisis de sensibilidad, que consistirá en variar un cierto intervalo los valores de los parámetros y analizar la variación del valor global resultante. Para facilitar su visualización, puede utilizarse un diagrama tipo “araña” como el del la figura 3.29¹⁹, donde se observe la incidencia de la variación de cada parámetro, lo cual será útil para la toma de decisión.

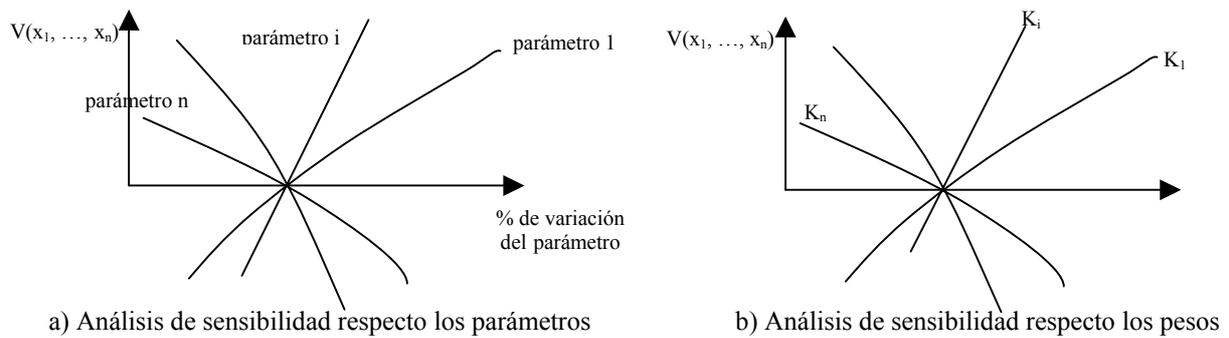


Figura 3.29. Resultados del análisis de sensibilidad

Dado el carácter difuso de los resultados, convendría realizar este análisis de sensibilidad mediante un diagrama de araña para cada uno de los cuatro puntos que definen los el número difuso del resultado del valor v . Sin embargo, aunque sería factible, esto no sería práctico, por el exceso de información que se generaría. Por esta razón, el diagrama de araña se planteará a partir de un valor p , punto medio entre a y b , que en definitiva es el punto central o medio del valor difuso obtenido (figura 3.30.). Con este valor bastará, generalmente para estimar la sensibilidad de los resultados.

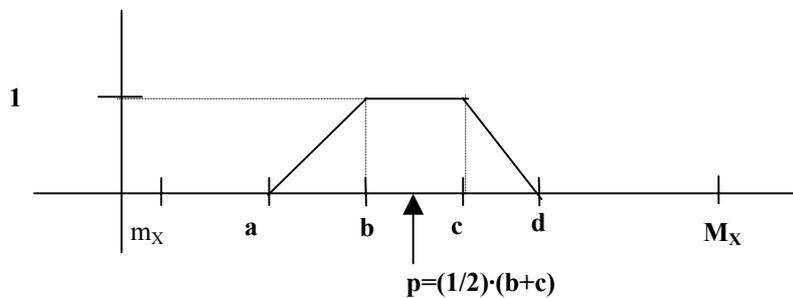


Figura 3.30. Valor adoptado para realizar el análisis de sensibilidad (p)

E.2.6. *Toma de decisión y justificación; Presentación de resultados*

Finalmente se tomará la decisión acerca de la elección entre las alternativas consideradas para cada punto de estudio justificándola mediante la ayuda de una tabla que sintetice los resultados obtenidos, análoga a la tabla 3.7.

¹⁹ El formato de este diagrama puede ser diverso. En la figura 3.29 se presenta un ejemplo recogido de Flanagan & Norman (1993)

Toma de decisión: Distribución en planta	Alternativa 1: Título				...				Alternativa n: Título			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
Valor sin riesgo (v^*)												
Severidad riesgo 1 (s_1)												
...												
Severidad riesgo m (s_m)												
Severidad intersección de riesgos												
Valor integrado ($V = \sum p_i \cdot s_i$)												
PV												
PR												
EV												
ER												

Tabla 3.7. Formato de la tabla de síntesis de resultados del proceso ACE

Estos resultados pueden ir acompañados de un gráfico que represente los diversos valores integrados y que ayude de este modo a visualizar el resultado, análogo al de la figura 3.22 del apartado 3.4, donde se visualiza la preponderancia de una alternativa sobre otra, según el trapecio que representa el valor difuso de cada una esté más desplazado hacia la derecha. Recuérdese a este respecto que la relación de orden entre conjuntos difusos ha sido definida en el apartado 3.3.2.7 y justificada matemáticamente en el apéndice E de esta tesis.

Por otro lado, al observar esta relación de orden y la citada figura 3.22, cabe percatarse de que, en ocasiones, una alternativa podría presentar un valor medio más elevado que otra pero una dispersión mayor. Además, ambos valores difusos pueden estar incluidos el uno en el otro. En este caso, el sistema propuesto no aportará una solución unívoca, y el decisor tendrá la última palabra sobre si opta por una o por otra, ya que el presente tratamiento no determinará una preferencia desde el punto de vista racionalista, sino que describirá las diversas soluciones mediante un índice estandarizado e integrado: el valor. Esta característica es coherente con la idea de que el modelo propuesto únicamente pretende ser una herramienta de apoyo metodológico. Por tanto, los resultados de este modelo buscarán únicamente ayudar a estructurar y comprender mejor la toma de decisión. Pretender que el resultado obtenido de este análisis determine de forma unívoca la decisión, además de pretencioso, sería conceptualmente erróneo de acuerdo con las bases filosóficas adoptadas para el sistema aquí presentado, correspondientes al paradigma integrador anteriormente definido. Ni se plantea ni se pretende, por tanto, substituir el factor humano en la decisión final, sino potenciarlo y asistirlo mediante una herramienta que le permita profundizar en el estudio del problema.

3.6. EL IDS COMO SISTEMA

Los elementos descritos en apartados anteriores forman un conjunto al que se le ha aplicado el término de “sistema” de toma de decisión, entendiendo este término como un conjunto de elementos con un ordenamiento unitario. El esquema general del sistema es el recogido en la figura 3.31.

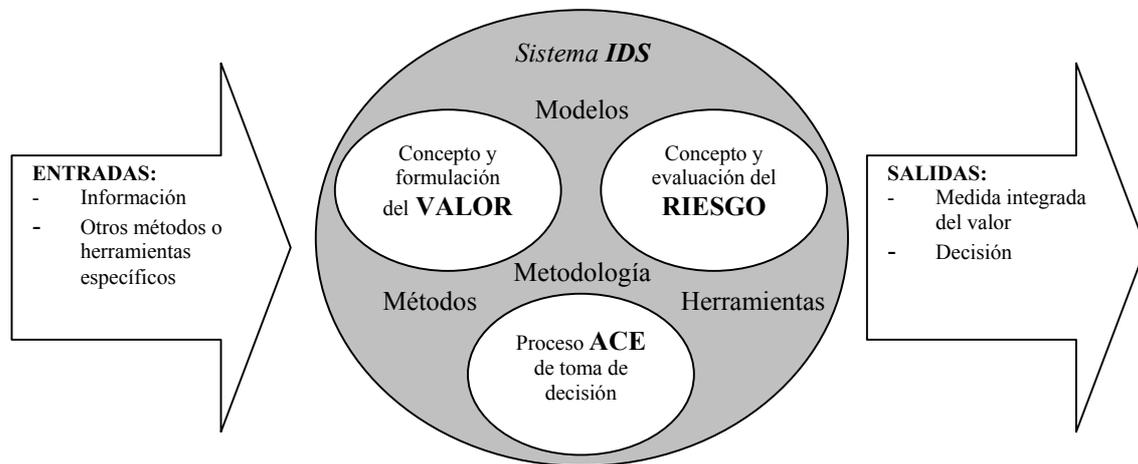


Figura 3.31. Esquema de los elementos del sistema IDS

Tal como se observa en la figura anterior, el IDS se amolda a la idea de sistema clásica como esquema de entradas y salidas. De hecho, la información sobre los diversos aspectos constituye las entradas del sistema y el resultado del valor obtenido mediante el aparato metodológico del IDS y la consecuente decisión sería la salida del sistema. Así mismo, el sistema contempla el acoplamiento de otros elementos exteriores escogidos *ad hoc* en función de las características de la aplicación concreta considerada, de manera que constituirían otras entradas del sistema.

Por otro lado, según se observa en la citada figura, el sistema propuesto es un entramado de elementos a los que podrían aplicárseles los diversos conceptos utilizados en el ámbito de la gestión: “herramienta”, “modelo”, “método” y “metodología”. Para su análisis detallado, servirá de base de discusión la definición que hace al respecto Tomlinson (1990)²⁰ en el contexto de la gestión:

- *Herramienta*: medio de apoyo para realizar una tarea consistente en transmitir o adquirir conocimiento, conseguir interacción o forzar un juicio sobre algo.
- *Modelo*: medio para describir alguna parte del problema llevada a cabo por los participantes del estudio
- *Método*: aproximación general a un problema

²⁰ Las versiones originales de estas definiciones son las siguientes (Tomlinson, 1990):

- Tool: a tool is a means by which a facilitator helps to achieve his immediate task whether that is to impart or extract knowledge, achieve interaction, force judgement...
- Model: a model is a means of describing some part of the organizational situation which is concern to the participants of the study
- Method: a method is a general approach to a problem
- Methodology: a methodology encompasses the philosophical and theoretical beliefs that underpin and lead to the construction of methods.

- *Metodología*: engloba los presupuestos teóricos y filosóficos que guían la construcción de los métodos.

Para articular este análisis, se procederá de lo más general a o más particular, es decir, desde el análisis del posible carácter metodológico de la aportación hasta su posible clasificación como simple herramienta.

En primer lugar, por tanto, cabe preguntarse si la presente aportación es una metodología. Según la definición de Tomlinson (1990), toda metodología ha de tener un substrato teórico y filosófico que en este caso se da. En el caso de la propuesta de esta tesis, el su fundamento filosófico es el paradigma integrador descrito en el capítulo 2. Dicho enfoque parte del reconocimiento parcial de las posturas filosóficas existentes en lo referente al tratamiento del problema de la toma de decisión, de modo que busca aplicar los elementos o planteamientos metodológicos de los paradigmas existentes, de forma aislada o combinada, según las características propias del problema tratado. Por tanto, en esta tesis se asume la opinión de que el engarce e integración de aspectos más “duros”, con una mayor carga matemática, y enfoques de una vertiente más social es la mejor manera de llenar los vacíos y limitaciones que tienen ambos tipos de enfoques, creando de esta manera un sistema de actuación abierto y con un gran potencial. De hecho, el paradigma integrador parte de la asunción del presupuesto de la racionalidad limitada de Simon (1979) por un lado, y por otro el reconocimiento de las limitaciones del enfoque sociológico.

Siguiendo en el plano filosófico, la presente aportación no trata, por tanto, de constituir un avance teórico en el estudio del comportamiento humano en lo referente a la toma de decisión, sino que pretende ser un instrumento orientado a la práctica e integrable con todos los posibles enfoques que pudieran derivarse de la citada disciplina. Esta última reflexión, que pudiera interpretarse como una obviedad, se considera de una trascendencia capital en la correcta interpretación del objetivo de esta propuesta, de cara a juzgar la importancia y el carácter innovador de la presente aportación teórica.

En síntesis, puede afirmarse que existe un sustrato teórico y, en cierto modo, filosófico, que subyace en la presente aportación, por lo que se le puede aplicar el término de “metodología”.

Sin embargo, no se trata de una metodología que se plantee únicamente en un nivel general, como un patrón que marque las pautas de futuros desarrollos. Al contrario, a lo largo de los capítulos anteriores se han descrito otros elementos de la propuesta aplicables en un nivel mayor de concreción. Por ejemplo, en lo referente al nuevo concepto de valor propuesto, puede hablarse de modelo, en cuanto representa y sirve para describir el concepto, sus elementos y relaciones. Por otro lado, puede aplicarse el término de “método” al proceso CIP de cálculo de los pesos, al proceso de estructuración de las entradas del sistema (mediante las matriz y el árbol de requerimientos) o al proceso ACE de toma de decisión. Finalmente, puede aplicarse el calificativo de “herramienta” al árbol de requerimientos o a las matrices de procesos y requerimientos, así como al tratamiento matemático del riesgo mediante matemática difusa.

En definitiva, según se observa en la tabla 3.8, el sistema IDS se compone de una metodología caracterizada por los principios del paradigma integrador, y unos métodos, modelos y herramientas anejos que forman un cuerpo coherente y abierto, un entramado o sistema de elementos (recogidos en la tabla 3.8) con una unidad interna orientada a hacer frente al problema de la toma de decisión.

FASE	HERRAMIENTAS	MÉTODOS	MODELO	METODOLOGÍA
ANÁLISIS	<ul style="list-style-type: none"> - Matriz de requerimientos - Matriz de procesos - Árbol de requerimientos - Otras posibles herramientas auxiliares (FAST, etc.). 	<ul style="list-style-type: none"> - Cálculo de los pesos (CIP) - Proceso de construcción del árbol de decisión (despliegue) - El proceso ACE de toma de decisión 	<ul style="list-style-type: none"> - Modelo integrado del concepto de valor 	El paradigma integrador
CREATIVIDAD		<ul style="list-style-type: none"> - Puede ser aplicable cualquier método de creatividad 	<ul style="list-style-type: none"> MIV - Modelo del concepto de riesgo puro - Modelizaciones del marco de referencia de la realidad considerada 	
EVALUACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> - Formulación del valor - Formulación de la severidad - Formulación del valor integrado - Índices de potencialidad y eficiencia - Otras herramientas auxiliares (diagrama de influencia y diagrama de impacto) 	<ul style="list-style-type: none"> - Análisis de compatibilidad - Análisis de sensibilidad 		

Tabla 3.8. Los elementos del sistema de toma de decisiones IDS.

Finalmente, cabe plantear un análisis de la propuesta descrita en este capítulo respecto a las aportaciones precedentes, recogidas en el estado del conocimiento. En este sentido, se plantea el apéndice F, que recoge una extensa discusión sobre el IDS, articulada en torno a los tres ejes de la propuesta: el problema de la toma de decisión, el valor y el riesgo.