UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

MODELO MULTICRITERIO APLICADO A LA TOMA DE DECISIONES REPRESENTABLES EN DIAGRAMAS DE ISHIKAWA

SERGIO BERNAL ROMERO

Cód.: 20121015078

DANIEL FELIPE NIÑO SANABRIA

Cód.: 20121015079

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

BOGOTÁ D.C.

2018

MODELO MULTICRITERIO APLICADO A LA TOMA DE DECISIONES REPRESENTABLES EN DIAGRAMAS DE ISHIKAWA

Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de:

INGENIERO INDUSTRIAL

Presentado por:

SERGIO BERNAL ROMERO

Cód.: 20121015078

DANIEL FELIPE NIÑO SANABRIA

Cód.: 20121015079

Dirigido por:

MEng. GUILLERMO ENRIQUE REAL FLOREZ

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

BOGOTÁ D.C.

2018

Resumen: La aplicabilidad de los diagramas de Ishikawa bajo el contexto de la toma de decisiones con criterios múltiples requiere de una metodología que guie al tomador de decisiones a lo largo de todo el proceso decisional. En este proyecto se propone un modelo multicriterio metodológico aplicado a la toma de decisiones representables en diagramas de Ishikawa, que valora las diferentes alternativas de solución planteadas a partir de las relaciones de causalidad identificadas en los diagramas de Ishikawa de forma adecuada y cuantificable.

Palabras clave: Diagrama de Ishikawa, Métodos multicriterio discretos, Toma de decisiones.

Abstract: The applicability of Ishikawa diagrams under the context of decision making with multiple criteria requires a methodology to guide the decision maker throughout the decisional process. This project proposes a methodological multicriteria model applied to the decision making representable in Ishikawa diagrams, which assesses the different solution alternatives proposed from the causality relationships identified in the Ishikawa diagrams in an adequate and quantifiable way.

Keywords: Ishikawa diagram, discrete multicriteria methods, decision making.

Índice general

ÍNDICE DE TABLAS ..... **III**

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **V**

INTRODUCCIÓN ..... **VII**

PRELIMINARES **1**

1.1 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 1
1.2 OBJETIVOS 2
1.3 JUSTIFICACIÓN 2
1.4 METODOLOGÍA 3

MARCO TEÓRICO **4**

2.1 TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO 5
2.2 EL PROCESO DE TOMA DE DECISIONES 7
2.3 MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO DISCRETOS 9
2.3.1 Métodos de ponderación de criterios *18*
2.3.1.1 Método CRITIC 18
2.3.1.2 Método de entropía 19
2.3.1.3 Método de Ordenación simple 20
2.3.1.4 Proceso de jerarquía analítica, AHP (Analytic Hierarchy Process) 21
2.3.1.5. Ponderación Compromiso de Criterios 28
2.3.2 Métodos para la valoración de alternativas *28*
2.3.2.1 Proceso de jerarquía analítica, AHP (Analytic Hierarchy Process) 28
2.3.2.2 Proceso Analítico en Red, ANP (Analytic Network Process). 30
2.3.2.3 Método SMART (Simple Multi-Atribute Rating Technique) 35
2.3.2.4 Método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) 36
2.3.2.5 Método VIKOR (VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromiso Resenje) 39
2.3.2.6 Método PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) 41
2.3.2.7 Método ZAPROS III (Closed Procedures near Reference Situations) 44
2.3.2.8 MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique) 47
2.3.2.9 Método ELECTRE I (ELimination Et Choix Traduisant la REalité) 49
2.4 PROPIEDADES DE LOS MCDM 54
2.5 DIAGRAMAS DE ISHIKAWA 56

DESARROLLO DEL PROYECTO **57**

3.1 ESTADO DEL ARTE. 58
3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MÉTODOS DE VALORACIÓN 65
3.3 MODELO PROPUESTO 69
3.4 EJEMPLIFICACIÓN DEL MODELO. 90

CONCLUSIONES **121**

BIBLIOGRAFÍA. **122**

Índice de tablas

TABLA 1. NORMALIZACIÓN POR LA SUMA. FUENTE AUTORES....16
TABLA 2. NORMALIZACIÓN POR EL RANGO. FUENTE AUTORES....16
TABLA 3. NORMALIZACIÓN LINEAL. BASADO EN (BAZZAZI ET AL., 2011). 17
TABLA 4. NORMALIZACIÓN VECTORIAL. FUENTE AUTORES....17
TABLA 5. PROPIEDADES DE LOS MCDM, TOMADO DE (GUARINI, 2018). 54
TABLA 6. CRITERIOS DE DECISIÓN PARA LA EVALUACIÓN DE MÉTODOS MCDM, BASADO EN (T. SAATY & DAJI, 2014).... 63
TABLA 7. CARACTERIZACIÓN DE LOS MÉTODOS SELECCIONADOS PARA LA PONDERACIÓN DE CRITERIOS, ENFOCADA A LA TOMA DE DECISIONES REPRESENTABLES EN DIAGRAMAS DE ISHIKAWA. FUENTE AUTORES. 66
TABLA 8. CARACTERIZACIÓN DE LOS MÉTODOS MULTICRITERIO DISCRETOS SELECCIONADOS PARA LA VALORACIÓN, ENFOCADA A LA TOMA DE DECISIONES REPRESENTABLES EN DIAGRAMAS DE ISHIKAWA. FUENTE AUTORES... 67
TABLA 9. ESCALA DE TRANSFERENCIA DE VARIABLES LINGÜÍSTICAS A NÚMEROS TRIANGULARES DIFUSOS, CRITERIO 1, NIVEL DE DECISIÓN ND 1.2.... 96
TABLA 10. ESCALA DE TRANSFERENCIA DE VARIABLES LINGÜÍSTICAS A NÚMEROS TRIANGULARES DIFUSOS, CRITERIO 3, NIVEL DE DECISIÓN ND 1.2. 96
TABLA 11. ESCALA DE TRANSFERENCIA DE VARIABLES LINGÜÍSTICAS A NÚMEROS TRIANGULARES DIFUSOS, CRITERIO 4, NIVEL DE DECISIÓN ND 1.2. 97
TABLA 12. ESCALA DE TRANSFERENCIA DE VARIABLES LINGÜÍSTICAS A NÚMEROS TRIANGULARES DIFUSOS, CRITERIO 5, NIVEL DE DECISIÓN ND 1.2. 97
TABLA 13. MATRIZ DE DECISIÓN, JUEZ 1, NIVEL DE DECISIÓN ND 1.2....98
TABLA 14. MATRIZ DE DECISIÓN, JUEZ 2, NIVEL DE DECISIÓN ND 1.2. 98
TABLA 15. MATRIZ DE DECISIÓN, JUEZ 3, NIVEL DE DECISIÓN ND 1.2. 98
TABLA 16. MATRIZ DE COMPARACIÓN PAREADA (CRITERIOS), AHP CON CONSENSO, NIVEL DE DECISIÓN ND 1.2. 99
TABLA 17. MATRIZ DE DECISIÓN AGREGADA, TOPSIS, NIVEL DE DECISIÓN ND 1.2. 100
TABLA 18. MATRIZ DE DECISIÓN NORMALIZADA PONDERADA, TOPSIS NIVEL DE DECISIÓN ND 1.2....100
TABLA 19. DISTANCIAS PIS, TOPSIS, NIVEL DE DECISIÓN ND 1.2....100
TABLA 20. DISTANCIAS NIS, TOPSIS, NIVEL DE DECISIÓN ND 1.2. 100
TABLA 21. RESULTADOS, TOPSIS, NIVEL DE DECISIÓN ND 1.2. 101
TABLA 22. PREFERENCIAS INDIVIDUALES, NIVEL DE DECISIÓN ND 1.2....101
TABLA 23. MATRIZ DE DECISIÓN, NIVEL DE DECISIÓN ND 1. 102
TABLA 24. MATRIZ DE COMPARACIÓN PAREADA (CRITERIOS), AHP, JUEZ1, NIVEL DE DECISIÓN ND1.... 103
TABLA 25. MATRIZ DE COMPARACIÓN PAREADA (CRITERIOS), AHP, JUEZ 2, NIVEL DE DECISIÓN ND1.... 103
TABLA 26. MATRIZ DE COMPARACIÓN PAREADA AGREGADA, AIJ, NIVEL DE DECISIÓN ND1. 103
TABLA 27. MATRIZ DE COMPARACIÓN PAREADA (ALTERNATIVAS), AHP, CRITERIO 1, NIVEL DE DECISIÓN ND 1. 104
TABLA 28. MATRIZ DE COMPARACIÓN PAREADA (ALTERNATIVAS), AHP, CRITERIO 2, NIVEL DE DECISIÓN ND 1.104
TABLA 29. MATRIZ DE COMPARACIÓN PAREADA (ALTERNATIVAS), AHP, CRITERIO 3, NIVEL DE DECISIÓN ND 1.104
TABLA 30. PREFERENCIAS INDIVIDUALES, NIVEL DE DECISIÓN ND 1.... 104
TABLA 31. MATRIZ DE DECISIÓN NIVEL DE DECISIÓN ND 2.1. 106
TABLA 32. PONDERACIÓN DE CRITERIOS, MÉTODO ORDENACIÓN SIMPLE, NIVEL DE DECISIÓN ND 2.1. 106
TABLA 33. PONDERACIÓN DE CRITERIOS, MÉTODO CRITIC, NIVEL DE DECISIÓN ND 2.1. 107
TABLA 34. PONDERACIONES COMPROMISO, NIVEL DE DECISIÓN ND 2.1.... 107
TABLA 35. VALORACIÓN DE ALTERNATIVAS, MÉTODO SMART, NIVEL DE DECISIÓN ND 2.1.... 107
TABLA 36. PREFERENCIAS INDIVIDUALES, NIVEL DE DECISIÓN ND 2.1. 108
TABLA 37. PREFERENCIAS INDIVIDUALES, ALTERNATIVAS SELECCIONADAS, NIVEL DE DECISIÓN ND 2.1.... 108
TABLA 38. MATRIZ DE DECISIÓN, NIVEL DE DECISIÓN ND 2.2.... 109
TABLA 39. PONDERACIÓN DE CRITERIOS, ORDENACIÓN SIMPLE, NIVEL DE DECISIÓN ND 2.2. 110

TABLA 40. PONDERACIÓN COMPROMISO DE CRITERIOS, NIVEL DE DECISIÓN, ND 2.2. 110
TABLA 41. COMPARACIÓN PAREADA, A221-A222, PROMETHEE II, NIVEL DE DECISIÓN ND 2.2. 111
TABLA 42. COMPARACIÓN PAREADA, A221-A223, PROMETHEE II, NIVEL DE DECISIÓN ND 2.2. 111
TABLA 43. COMPARACIÓN PAREADA, A222-A223, PROMETHEE II, NIVEL DE DECISIÓN ND 2.2. 111
TABLA 44. RESULTADOS, PROMETHEE II, NIVEL DE DECISIÓN ND 2.2. 112
TABLA 45. PREFERENCIAS INDIVIDUALES, NIVEL DE DECISIÓN ND 2.2. 112
TABLA 46. MATRIZ DE DECISIÓN, NIVEL DE DECISIÓN ND 2. 114
TABLA 47. ESCALA DE TRANSFERENCIA DE VARIABLES LINGÜÍSTICAS A NÚMEROS TRIANGULARES DIFUSOS, NIVEL DE DECISIÓN ND 2. 114
TABLA 48. MATRIZ DE DECISIÓN ND 2, NTD. 114
TABLA 49. MATRIZ DE COMPARACIÓN PAREADA (CRITERIOS), AHP, NIVEL DE DECISIÓN ND 2. 115
TABLA 50. MATRIZ DE DECISIÓN, MÉTODO VIKOR, NIVEL DE DECISIÓN ND 2. 115
TABLA 51. MATRIZ DE DECISIÓN NORMALIZADA, MÉTODO VIKOR, NIVEL DE DECISIÓN ND 2. 116
TABLA 52. PIS Y NIS, VIKOR, NIVEL DE DECISIÓN ND 2. 116
TABLA 53. RESULTADOS, VIKOR, NIVEL DE DECISIÓN ND 2. 116
TABLA 54. PRIORIDADES INDIVIDUALES, NIVEL DE DECISIÓN ND 2. 116
TABLA 55. PRIORIDADES INDIVIDUALES, NIVEL DE DECISIÓN GENERAL. 119

Índice de figuras

FIGURA 1. PARADIGMA TRADICIONAL DE OPTIMIZACIÓN. FUENTE AUTORES. 5
FIGURA 2. OPTIMALIDAD PARETIANA, FUENTE AUTORES..... 7
FIGURA 3. PROCESO GENERALIZADO DE LA TOMA DE DECISIONES. ADAPTADO DE (BAKER ET AL., 2001; FÜLÖP, 2005). 8
FIGURA 4. AXIOMAS DE LA TEORÍA DE UTILIDAD MULTIATRIBUTO. BASADO EN (PACHECO & CONTRERAS, 2008). 10
FIGURA 5 . CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO DISCRETOS. FUENTE AUTORES. 11
FIGURA 6. NÚMERO E INTERVALO DIFUSO. TOMADO DE (REINA, 2008). 13
FIGURA 7. TRANSFERENCIA DE VARIABLES LINGÜÍSTICAS A NÚMEROS TRIANGULARES DIFUSOS. FUENTE AUTORES. 13
FIGURA 8 EJEMPLO DE TRANSFERENCIA DE VALORES LINGÜÍSTICOS A NÚMEROS TRIANGULARES DIFUSOS, TOMADO DE (BAZZAZI, OSANLOO, & KARIMI, 2011). 14
FIGURA 9. MÉTODO CRITIC. FUENTE AUTORES. 18
FIGURA 10. MÉTODO DE ENTROPÍA. FUENTE AUTORES. 19
FIGURA 11. MÉTODO DE ORDENACIÓN SIMPLE. FUENTE AUTORES. 20
FIGURA 12. MÉTODO APH PARA PONDERACIÓN DE CRITERIOS, FUENTE AUTORES. 21
FIGURA 13. CÁLCULO DE LA RAZÓN DE CONSISTENCIA. FUENTE AUTORES. 23
FIGURA 14. AGREGACIÓN DE JUICIOS EN AHP. FUENTE AUTORES. 24
FIGURA 15. AGREGACIÓN DE PRIORIDADES INDIVIDUALES (AIP). FUENTE AUTORES. 25
FIGURA 16. AGREGACIÓN DE JUICIOS INDIVIDUALES (AIJ). FUENTE AUTORES. 26
FIGURA 17. MÉTODO AHP PARA LA VALORACIÓN DE ALTERNATIVAS. FUENTE AUTORES. 29
FIGURA 18. SUPERMATRIZ ORIGINAL, PARA UN CLÚSTER DE CRITERIOS Y UN CLÚSTER DE ALTERNATIVAS, FUENTE AUTORES. 32
FIGURA 19. SUPERMATRIZ LIMITE, PARA UN CLÚSTER DE CRITERIOS Y UN CLÚSTER DE ALTERNATIVAS. FUENTE AUTORES. 33
FIGURA 20. MÉTODO SMART. FUENTE AUTORES. 35
FIGURA 21. MÉTODO TOPSIS. FUENTE AUTORES. 37
FIGURA 22. MÉTODO VIKOR. FUENTE AUTORES. 39
FIGURA 23. MÉTODO PROMETHEE II. FUENTE AUTORES. 42
FIGURA 24. EL MÉTODO ZAPROS III. FUENTE AUTORES. 44
FIGURA 25. MÉTODO MACBETH. FUENTE AUTORES. 47
FIGURA 26. CLASIFICACIÓN MÉTODOS ELECTRE. TOMADO DE (MAYSTRE ET AL., 1994). 49
FIGURA 27. MÉTODO ELECTRE I. FUENTE AUTORES. 53
FIGURA 28. DIAGRAMA DE ISHIKAWA. TOMADO DE (ISHIKAVA, 1976). 56
FIGURA 29. CONSIDERACIÓN 1 Y 2. 70
FIGURA 30. NIVELES DE DECISIÓN (EJEMPLO 1 Y 2). 72
FIGURA 31. NIVELES DE DECISIÓN (EJEMPLO 3 Y 4). 72
FIGURA 32. VALORACIÓN DIRECTA. 73
FIGURA 33.VALORACIÓN ASCENDENTE. 74
FIGURA 34. AGRUPACIÓN DE ALTERNATIVAS. 76
FIGURA 35. ESQUEMA GENERAL PARA LA VALORACIÓN DE DIAGRAMAS DE ISHIKAWA. 77
FIGURA 36. ELECCIÓN DEL MÉTODO PARA PONDERACIÓN DE CRITERIOS. 79
FIGURA 37. ELECCIÓN DEL MÉTODO PARA VALORACIÓN DE ALTERNATIVAS. 82
FIGURA 38. CÁLCULO DE LAS PRIORIDADES GLOBALES INDIVIDUALES. 89
FIGURA 39. DIAGRAMA DE ISHIKAWA, EJEMPLO ILUSTRATIVO. 90

FIGURA 40. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS A PARTIR DE CAUSAS Y SUB CAUSAS DEL DIAGRAMA DE ISHIKAWA. 91
FIGURA 41. IDENTIFICACIÓN DE OBJETIVOS NO FACTIBLES. 92
FIGURA 42. PLANTEAMIENTO DE OBJETIVOS NO FACTIBLES COMO ALTERNATIVAS. 92
FIGURA 43. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS DE DECISIÓN FACTIBLES. 93
FIGURA 44. CONSTRUCCIÓN DE LOS NIVELES DE DECISIÓN. 94
FIGURA 45. NIVEL DE DECISIÓN ND 1.2. 95
FIGURA 46. NIVEL DE DECISIÓN ND 2.1. 105
FIGURA 47. NIVEL DE DECISIÓN ND 2.2. 109
FIGURA 48. CRITERIO GENERALIZADO, TIPO: GAUSSIANO, S=0,12, NIVEL DE DECISIÓN ND 2.2. 111
FIGURA 49. NIVEL DE DECISIÓN ND 2. 113
FIGURA 50. RESULTADOS, SOFTWARE M-MACBETH, NIVEL DE DECISIÓN GENERAL. 118
FIGURA 51. PRIORIDADES INDIVIDUALES, EJEMPLO ILUSTRATIVO. 119
FIGURA 52. PRIORIDADES GLOBALES, EJEMPLO ILUSTRATIVO. 120

Introducción

Los responsables de la toma de decisiones a menudo se enfrentan a problemas de decisión complicados con criterios intangibles y conflictivos. Se han propuesto numerosos métodos de toma de decisiones multicriterio (MCDM) para manejar la medición de las prioridades de los criterios contradictorios tangibles e intangibles y, a su vez, utilizarlos para elegir la mejor alternativa para una decisión (T. Saaty & Daji, 2014)

Bajo el contexto de la toma decisiones con criterios múltiples, una aplicación distinta de los Diagramas de Ishikawa, consistiría en el uso de relaciones de causalidad para definir y valorar cursos de acción potenciales.

En este proyecto se propone un modelo multicriterio metodológico aplicado a la toma de decisiones representables en diagramas de Ishikawa, que valora las diferentes alternativas de solución planteadas a partir de las relaciones de causalidad identificadas en los diagramas de Ishikawa de forma adecuada y cuantificable.

Este documento esta divido en tres partes, en el Capítulo 1 se describen los aspectos preliminares que llevaron a la creación del proyecto, el Capítulo 2 presenta los aspectos teóricos relevantes para el desarrollo del proyecto; el capítulo 3 está conformado por el estado del arte del uso y la integración entre los diagramas de Ishikawa y los métodos multicriterio, la caracterización de los métodos seleccionados, el modelo propuesto y un ejemplo ilustrativo

CAPÍTULO 1

Preliminares

1.1 Descripción y Formulación del Problema

Los diagramas de Ishikawa son herramientas de diagnóstico utilizadas para identificar las causas potenciales de un evento. Existen diversas técnicas y filosofías para llevar a cabo el análisis de causa raíz de un problema a partir de estos diagramas.

Bajo el contexto de la toma decisiones con criterios múltiples, una aplicación distinta de los Diagramas de Ishikawa, consistiría en el uso de relaciones de causalidad para definir cursos de acción potenciales. El uso de métodos multicriterio permitiría definir que causas o sub causas, deberían ser intervenidas. De forma tal que se obtenga cierto nivel de satisfacción en un conjunto de variables de interés y se aumente, disminuya o controle la ocurrencia de un efecto.

Existe una amplia gama de métodos multicriterio discretos que podrían ser utilizados para dicho fin. Se ha identificado la necesidad de diseñar una metodología que facilite la elección de los métodos para la valoración de diagramas de Ishikawa de forma adecuada y cuantificable, en función de las relaciones de causalidad y variables de interés.

¿Como es posible cuantificar cada una de las ramas en un gráfico de Ishikawa de forma tal que se tomen decisiones adecuadas?

Para efectos del alcance del proyecto se parte de la premisa de que los diagramas han sido previamente validados verificando las relaciones de causalidad.

1.2 Objetivos

Objetivo General

Diseñar un modelo metodológico que valore diagramas de Ishikawa enfocados de manera adecuada y cuantificable hacia la toma de decisiones.

Objetivos Específicos

- Establecer el estado del arte de la teoría de la decisión multicriterio definiendo las técnicas a considerar para la valoración de las alternativas de decisión representables en diagramas de Ishikawa.

- Caracterizar los métodos de valoración a utilizar en el diseño del modelo metodológico, definiendo sus aplicabilidades en función de las características particulares de los diagramas de Ishikawa en cada uno de sus niveles.

- Estructurar el modelo definiendo los parámetros que permitan definir el conjunto de técnicas a utilizar en la valoración de diagramas de Ishikawa para la adecuada toma de decisiones.

- Ejemplificar el modelo propuesto, para ilustrar su aplicabilidad en la toma de decisiones.

1.3 Justificación

Los métodos de decisión multicriterio son utilizados para valorar alternativas de decisión en un contexto con distintos objetivos en conflicto y un entorno incierto. La utilización de estos métodos permite integrar a la toma de decisiones tanto conocimientos objetivos como subjetivos, definidos en términos de variables cuantitativas y cualitativas. (Aznar, 2012)

Bajo esta premisa, para la toma de decisiones representables en diagramas de Ishikawa se debería tener en cuenta un conjunto de criterios que permitan valorar una serie de alternativas finitas y por lo tanto resulta conveniente la utilización de métodos de decisión multicriterio discretos para enfocar de manera efectiva los recursos hacia la solución de un problema.

Teniendo en cuenta que actualmente se cuenta con diferentes métodos de decisión multicriterio discretos, resulta pertinente el diseño de una metodología que facilite al tomador de decisiones la elección adecuada de los mismos.

1.4 Metodología

La metodología utilizada para el desarrollo del proyecto está estructurada de la siguiente forma:

En primera instancia, el establecimiento del estado del arte del uso y la integración entre los diagramas de Ishikawa y los métodos multicriterio, que permitirá la elección de los métodos a considerar en el modelo.

Posteriormente se llevará a cabo una revisión teórica de la decisión multicriterio y los métodos elegidos. Esta información será utilizada para realizar una caracterización de los métodos enfocada a la valoración de los Diagramas de Ishikawa.

La siguiente fase consistirá en el diseño del modelo metodológico que incorpore los aspectos teóricos relevantes identificados.

Finalmente, se concluirá con la ejemplificación de modelo propuesto para ilustrar su aplicabilidad en la toma de decisiones.

CAPÍTULO 2

Marco teórico

En este capítulo se tratan los aspectos teóricos que fueron necesarios para el desarrollo del proyecto:

En la primera sección se exhiben los antecedentes de la teoría de la toma de decisiones multicriterio y el Proceso de la toma de decisiones.

En la siguiente sección se examinan las generalidades de la Matriz de decisión y la Normalización, posteriormente se clasifican y describen los métodos de decisión multicriterio discretos considerados.

Finalmente se hace una breve introducción a las generalidades de los Diagramas de Ishikawa.

2.1 Toma de Decisiones Multicriterio

Un proceso de toma de decisiones consiste en la elección por parte de uno o varios Individuos de la mejor alternativa entre un conjunto de posibles soluciones, un enfoque tradicional sugiere la existencia de un determinado grupo de restricciones generadas por las limitaciones en recursos, donde el valor de las variables de decisión que satisfacen estas restricciones constituyen lo que se denomina el conjunto factible o alcanzable, este conjunto puede ser continuo cuando existen infinitas soluciones factibles o discreto cuando se cuenta con un número finito de soluciones factibles.

Para determinar la mejor alternativa se define una función de criterio que refleja adecuadamente las preferencias o deseos de cada uno de los decisores (Grajales Quintero, Serrano Moya, & Hahn Von-H, 2013). Esto requiere de un proceso dividido en dos fases, en la primera a partir de una información técnica se concreta lo que es posible, mientras que en la segunda los juicios preferenciales de un grupo de decisores definen lo mejor. Esta función de criterio también conocida como función de utilidad o función de valor, asocia un número real a cada solución factible, que posteriormente se optimiza mediante técnicas matemáticas (Romero, 1996).

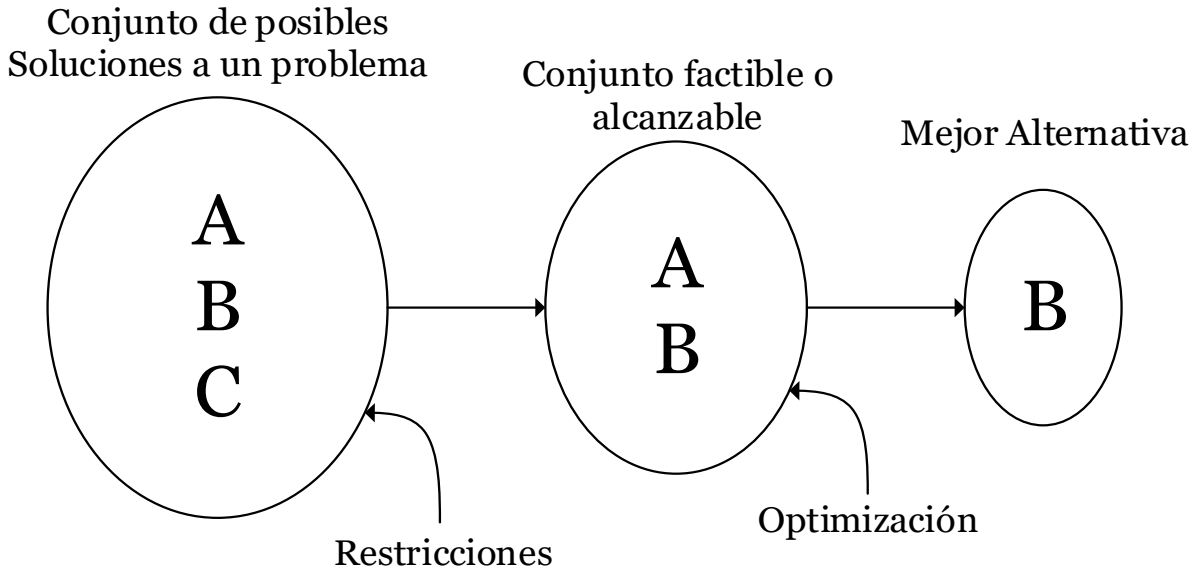


Figura 1. Paradigma tradicional de optimización. Fuente Autores.

Este es el marco de referencia para cualquier problema de decisión investigado dentro del paradigma tradicional de la optimización, un claro ejemplo de su aplicación se encuentra en trabajos realizados por economistas a finales del siglo XIX y principios del siglo XX sobre el comportamiento de los consumidores a la hora de elegir en la compra de un producto (M. D. S. García, 2009). Los problemas de decisión abordados por medio de la programación matemática también se ajustan a este tipo de estructura teórica, donde esta función de criterio recibe el nombre de función objetivo, recurriendo a técnicas de resolución como el algoritmo simplex.

Esta estructura paradigmática es adecuada desde el punto de vista de la lógica, pero desde un punto de vista práctico, presenta relevantes debilidades que la desvían considerablemente de los procesos reales de toma de decisiones. Los decisores no siempre desean valorar las soluciones factibles teniendo en cuenta tan solo un criterio, sino que plantean diferentes criterios que reflejan sus preferencias particulares(Romero, 1996).

Los decisores reales toman sus decisiones con base a varios objetivos y no a un único criterio, de ahí el surgimiento del paradigma decisional multicriterio. En 1896 Pareto mostró que en situaciones en las que varios agentes económicos realizan elecciones diferentes y en conflicto, éstos no podían obtener su satisfacción máxima al mismo tiempo, siendo los recursos limitados, lo que uno gana lo hace en detrimento de otro. Estas situaciones se denominan óptimos de Pareto. Ante esta problemática surgieron las técnicas de decisión multicriterio con el objetivo de resolver estas situaciones y hallar el modo de satisfacer, en la medida de lo posible, al mayor número de agentes económicos, intentando buscar un equilibrio entre los intereses contrapuestos de éstos (M. D. S. García, 2009).

El criterio de optimalidad paretiana puede transferirse de una manera directa de la economía al análisis decisional multicriterio. Para ello, basta sustituir el concepto original de Pareto de sociedad o colectivo de personas por el de conjunto de criterios. Así, cada criterio individual representa a una persona en esta nueva interpretación. Esta traslación del concepto de optimalidad paretiana juega un papel esencial en los diferentes enfoques desarrollados dentro del paradigma multicriterio (Romero, 1996).

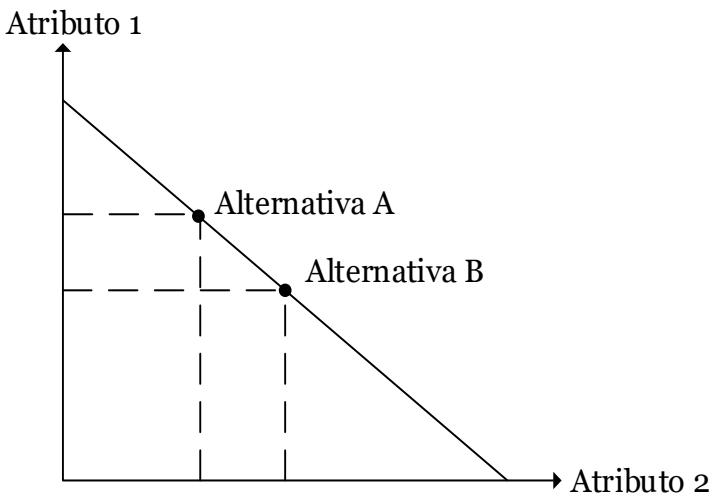


Figura 2. Optimalidad paretiana, fuente autores.

Puede decirse que la eficiencia paretiana es una condición exigida como necesaria para poder garantizar la racionalidad de las soluciones generadas por los diferentes enfoques multicriterio. El concepto de optimalidad paretiana dentro del campo multicriterio puede definirse formalmente como: Un conjunto de soluciones es eficiente o Pareto óptimas cuando está formado por soluciones factibles tales que no existe otra solución factible que proporcione una mejora en un atributo sin producir un empeoramiento en al menos otro de los atributos. Las técnicas de toma de decisión multicriterio, como tal, han sido materia de investigación desde los años 40 y ha tenido un importante desarrollo en las últimas décadas (M. D. S. García, 2009).

2.2 El Proceso de Toma de Decisiones

La toma de decisiones es el estudio de la identificación y elección de alternativas basadas en los valores y las preferencias del tomador de decisiones. Tomar una decisión implica que hay alternativas a considerar y en tal caso no solo queremos identificar tantas de estas alternativas como sea posible, sino elegir la que mejor se adapte a nuestras metas, objetivos, deseos, valores y todo esto en poco tiempo. La primera prioridad al tomar una decisión es establecer quiénes son los responsables de la toma de decisiones y las partes interesadas en la decisión (Baker et al., 2001; Fülöp, 2005).

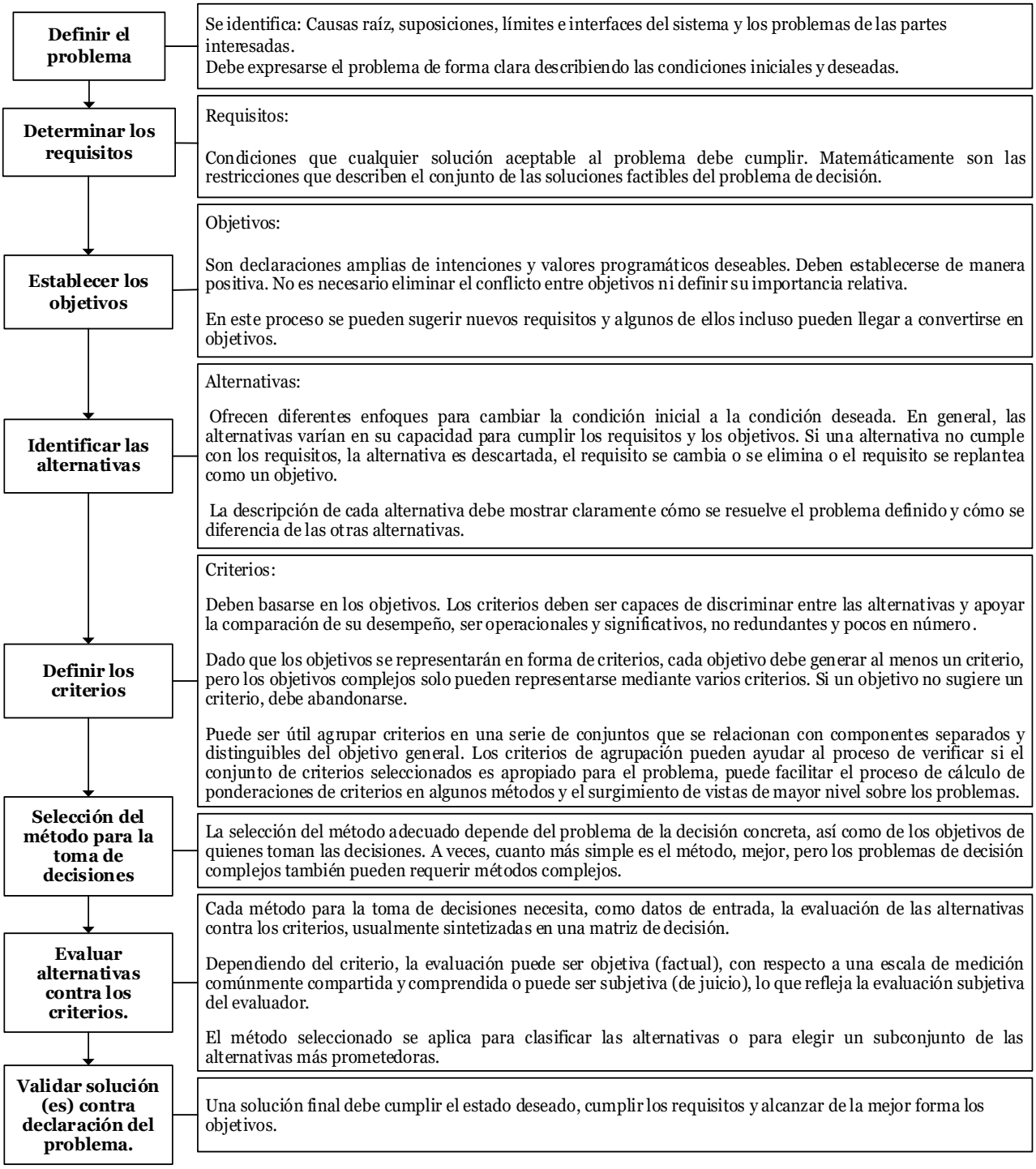


Figura 3. Proceso generalizado de la toma de decisiones. Adaptado de (Baker et al., 2001; Fülöp, 2005).

2.3 Métodos de Decisión Multicriterio Discretos

Dependiendo de la naturaleza del problema de decisión existen técnicas adecuadas para su planteamiento y solución, cuando se tiene tan solo una variable de decisión se usa la optimización clásica continua o discreta dependiendo del conjunto de soluciones factibles, mientras que cuando se requiere el estudio de un conjunto de varias variables se usa la optimización multiobjetivo u optimización vectorial para conjuntos continuos y análisis multicriterio discreto para conjuntos discretos (Munda, 1997).

Los métodos multicriterio pueden clasificarse en (Pacheco & Contreras, 2008):

1. Métodos sin información a priori (generadoras): Aquellas en las que el flujo de información va desde el analista al decisor. Entre estos métodos destacan: el método de ponderaciones y el simplex multicriterio.
2. Métodos con información a priori: El flujo de información es en el sentido contrario, del decisor al analista.
3. Métodos en las que el flujo de información es en los dos sentidos, dando lugar a las denominadas técnicas interactivas.

Dentro de la clasificación de los MCDM discretos se contemplan dos escuelas tradicionales:

Métodos de Agregación, escuela americana:
La base de los métodos basados en MAUT es el uso de funciones de utilidad. Las funciones de utilidad se pueden aplicar para transformar los valores de rendimiento de las alternativas frente a diversos criterios a una escala común, sin dimensiones, permitiendo el ordenamiento completo del conjunto de alternativas (Fülöp, 2005).

La teoría de utilidad multiatributo (MAUT) busca expresar las preferencias del decisor sobre un conjunto de criterios en términos de la utilidad que le reportan.

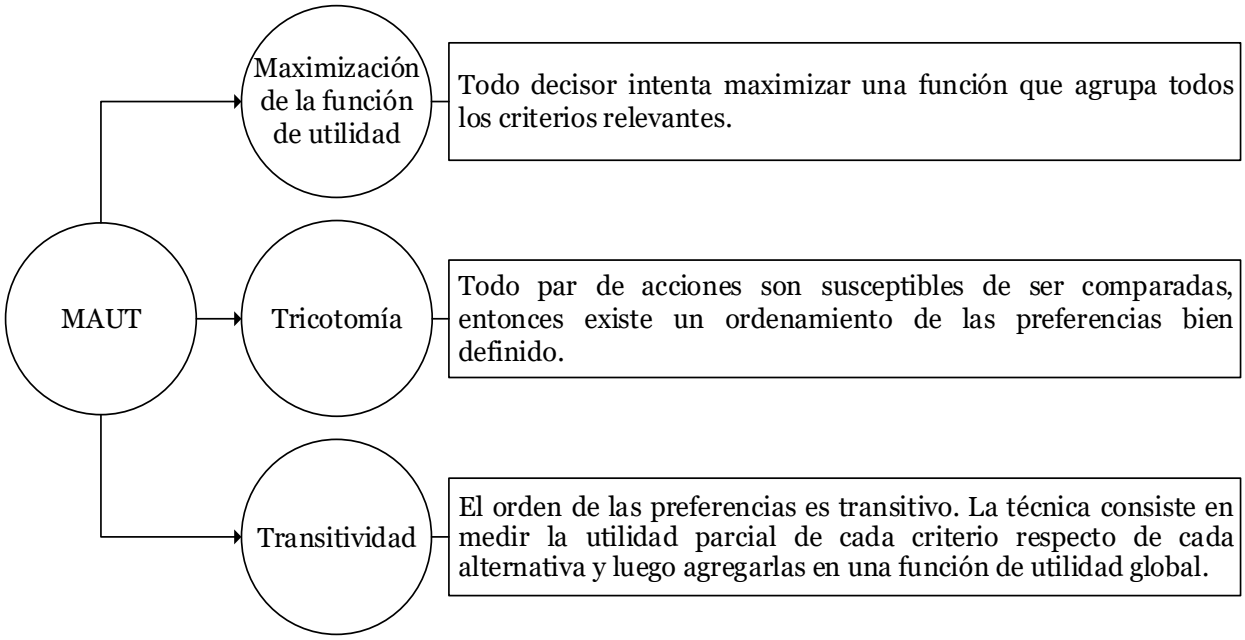


Figura 4. Axiomas de la Teoría de Utilidad Multiatributo. Basado en (Pacheco & Contreras, 2008).

Métodos basados en relaciones de superación, escuela europea:

Los métodos de Superación, Sobre clasificación u Outranking, comparan dos alternativas respecto a todos los criterios a través de relaciones binarias que modelan las preferencias. Se busca determinar si una alternativa supera a otra buscando criterios suficientes que señalen su supremacía. Las relaciones que se establecen no son necesariamente transitivas (Pacheco & Contreras, 2008).

El termino sobreclasificación es diferente al de dominación, en la sobreclasificación una alternativa puede ser mejor que otra, aunque no lo sea en todos los criterios. Las relaciones de superación pueden ser de tres tipos, Preferencia, Indiferencia e in comparabilidad (Brans & Mareschal, 2005).

Los métodos adecuados para la toma de decisiones cuando el conjunto de alternativas es discreto y se cuenta con información a priori pueden clasificarse de la siguiente forma:

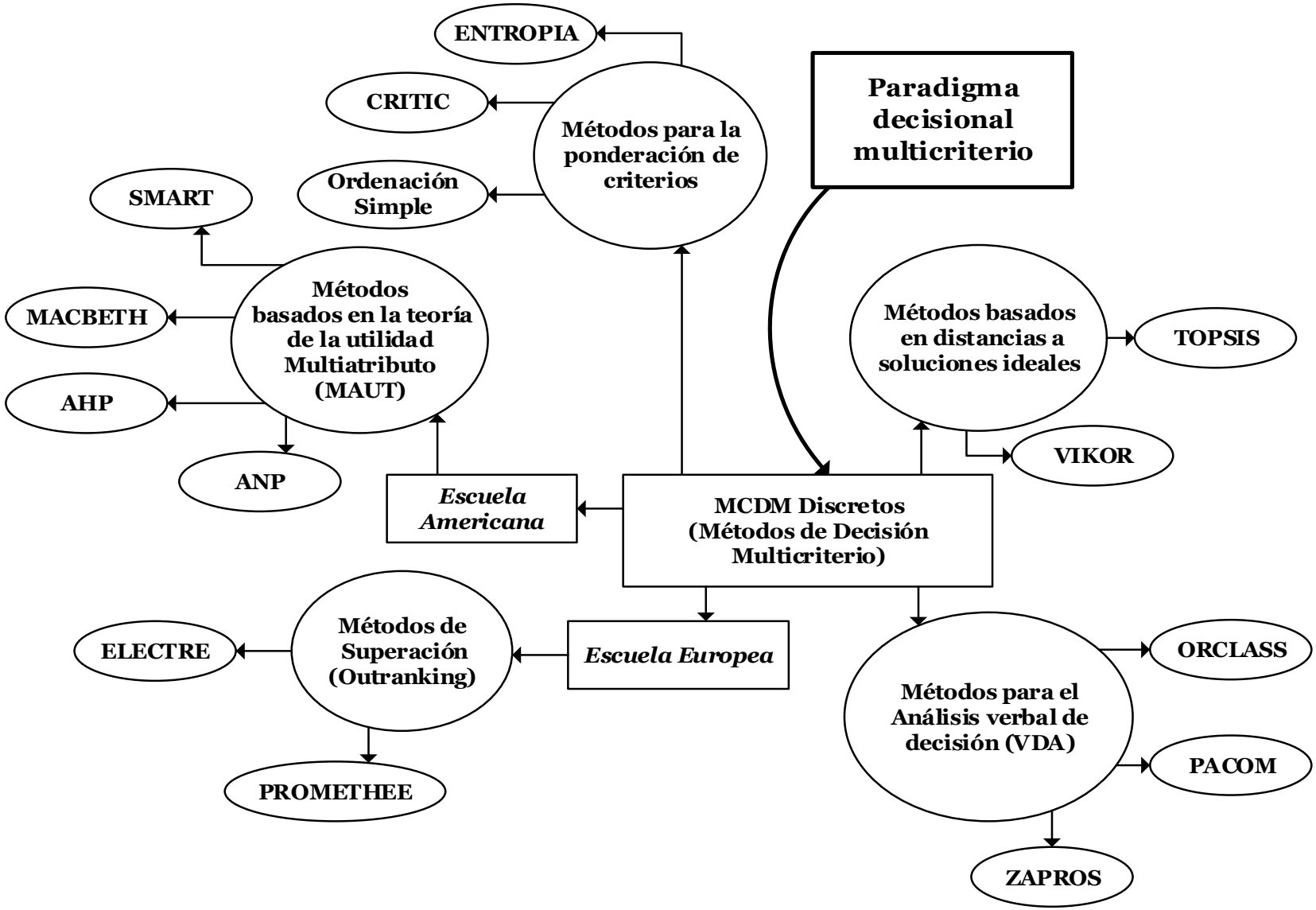


Figura 5 . Clasificación de los Métodos de Decisión multicriterio discretos. Fuente Autores.

Matriz de decisión

En los problemas de decisión multicriterio el conjunto de alternativas (A_i), criterios (C_j) y las evaluaciones de cada alternativa respecto a cada uno de los criterios (x_{ij}) se condensan en una matriz de decisión.

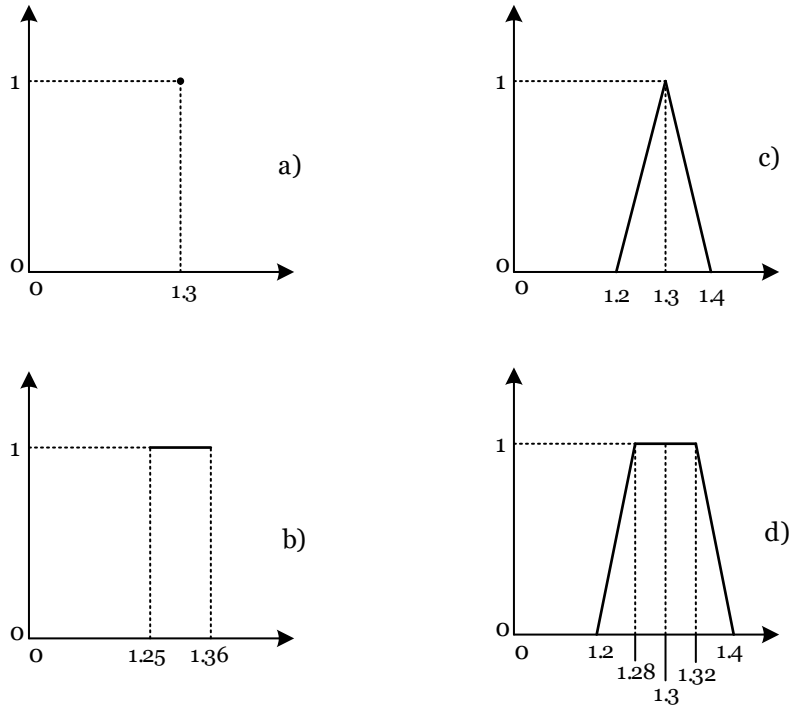
$$
\begin{array}{c}
 \\ A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_m
\end{array}
\begin{array}{c}
\begin{array}{cccccc} C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_n \end{array} \\
\begin{bmatrix}
x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1n} \\
x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2n} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn}
\end{bmatrix}
\end{array}
$$

Figura 5. Matriz de decisión, fuente autores.

La creación de esta matriz es un paso preliminar a la aplicación de la mayoría de los métodos considerados, dado que aporta la información de entrada mínima requerida. La valides de las valoraciones de las alternativas generadas por un método dependerán directamente de la veracidad y la relevancia de la información suministrada por la matriz de decisión.

Las evaluaciones contenidas en la matriz pueden ser valores determinísticos, intervalos o variables lingüísticas que pueden ser transferidas a números difusos (esto último para los métodos que usan esta matriz como información de entrada).

Existen diferentes tipos de números difusos que pueden ser utilizados (triangulares, trapezoidales, entre otros). A continuación, se ilustra el tratamiento necesario para la utilización de variables lingüísticas como números triangulares difusos, ampliamente utilizados por su relativamente cómoda manipulación (Morillas, 2006). El uso de otro tipo de número difuso se realizaría de manera similar.



a) Determinístico: Número real ordinario 1.3
b) Intervalo ordinario [1.25, 1.36]
c) Número difuso triangular: (1.2,1.3,1.4), expresa la proposición "cerca de 1.3"
d) Número difuso trapezoidal: (1.2,1.28,1.32,1.4), expresa la proposición "cerca del intervalo [1.28, 1.32]"

Figura 6. Número e Intervalo difuso. Tomado de (Reina, 2008).

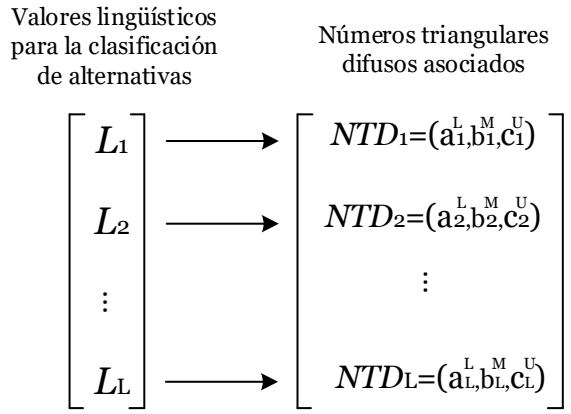


Figura 7. Transferencia de variables lingüísticas a números triangulares difusos. Fuente autores.

Valores lingüísticos para la clasificación de alternativas	Números triangulares difusos asociados
El mejor	(0.8,0.9,1)
Mejor	(0.7,0.8,0.9)
Muy Bueno	(0.6,0.7,0.8)
Bueno	(0.5,0.6,0.7)
Normal	(0,4,0.5,0.6)
Malo	(0.3,0.4,0.5)
Muy malo	(0.2,0.3,0.4)
Peor	(0.1,0.2,0.3)
El Peor	(0,0.1,0.2)

Figura 8 Ejemplo de transferencia de valores lingüísticos a números triangulares difusos, tomado de (Bazzazi, Osanloo, & Karimi, 2011).

Sí un conjunto de K jueces, clasifica individualmente un conjunto de alternativas i en función de un criterio j, en una categoría lingüística L (Cada una de estas categorías posee un número triangular difuso asociado que será tomado como la evaluación de la alternativa en la matriz de decisión), la agregación de K evaluaciones x_{ijk} para una alternativa i, se lleva a cabo de la siguiente forma (Nadaban, Dzitac, & Dzitac, 2016):

$$X_{ij} = \left(X_{ij}^{L}, X_{ij}^{M}, X_{ij}^{U}\right)$$

$$X_{ij}^{L} = min_k\left(x_{ijk}^{L}\right), X_{ij}^{M} = \frac{1}{\mathrm{K}}\sum_{k=1}^{\mathrm{K}} x_{ijk}^{M}, X_{ij}^{U} = max_k\left(x_{ijk}^{U}\right)$$

En algunos métodos multicriterio es necesario determinar los valores máximos y mínimos dentro de las evaluaciones de un conjunto de alternativas i respecto a un criterio j y la distancia entre cada par de evaluaciones. A continuación, se describe el procedimiento para encontrar estos valores, cuando se tienen evaluaciones expresadas como intervalos y/o números triangulares difusos y se presenta el proceso de defuzzificación mediante el método COG (Bazzazi et al., 2011) (Afful-Dadzie, Nabareseh, Oplatková, & Klimek, 2016):

- El número difuso máximo es aquel con el valor promedio mayor.

$$\overline{\mathrm{X}}\left[{x_{ij}}^{L}, {x_{ij}}^{M}, {x_{ij}}^{U}\right] = \frac{1}{3}\left({x_{ij}}^{L} + {x_{ij}}^{M} + {x_{ij}}^{U}\right)$$

- Si el valor promedio de dos números triangulares difusos es igual, entonces el máximo es el que tiene una desviación estándar más baja.

$$\sigma\left[{x_{ij}}^L, {x_{ij}}^M, {x_{ij}}^U\right] = \frac{1}{18}\left(\left({x_{ij}}^L\right)^2 + \left({x_{ij}}^M\right)^2 + \left({x_{ij}}^U\right)^2 + {x_{ij}}^L{x_{ij}}^M - {x_{ij}}^L{x_{ij}}^U - {x_{ij}}^M{x_{ij}}^U\right)$$

- La elección del intervalo mínimo, de un par de intervalos $[a^L, a^U]$ y $[b^L, b^U]$, se realiza de la siguiente forma:

Si estos números de intervalo no tienen intersección, el intervalo mínimo es aquel con los valores más bajos. En otras palabras: si $a^U \leq b^L$, entonces, se elige a $[a^L, a^U]$ como número de intervalo mínimo.

Si dos números de intervalo son iguales, ambos tienen la misma prioridad.

En situaciones que $a^L \leq b^L < b^U \leq a^U$, si $(b^L - a^L) \geq (a^U - b^U)$ entonces $[a^L, a^U]$ es el intervalo mínimo, si esta condición no se cumple, $[b^L, b^U]$ es el intervalo mínimo.

En situaciones que $a^L < b^L < a^U < b^U$, si $(b^L - a^L) \geq (b^U - a^U)$ entonces $[a^L, a^U]$ es el intervalo mínimo, si esta condición no se cumple, $[b^L, b^U]$ es el intervalo mínimo.

- Distancia entre dos intervalos $[a^L, a^U]$ y $[b^L, b^U]$:

$$D(a, b) = \frac{\sqrt{2}}{2}\sqrt{(a^L - b^L)^2 + (a^U - b^U)^2}$$

- Distancia entre dos números triangulares difusos (a_1, a_2, a_3) y (b_1, b_2, b_3):

$$D(\tilde{a}, \tilde{b}) = \frac{\sqrt{3}}{3}\sqrt{(a_1 - b_1)^2 + (a_2 - b_2)^2 + (a_3 - b_3)^2}$$

- Puede utilizarse las funciones singleton para convertir un único número Determinístico en un conjunto difuso:

$$x_{ij} = \left(x_{ij}, x_{ij}, x_{ij}\right)$$

- Método COG para defuzzificación:

$$x^* = \frac{\sum_{i=1}^{N} A_i \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^{N} A_i}$$

N indica el número de sub áreas, A_i y $\bar{x}_i$ representa al área y al centro del área respectivamente de la i-ésima sub área.

Normalización

La mayoría de métodos multicriterio exigen la previa normalización de la información. La razón de esta normalización está en la necesidad de unificar las unidades de medida necesarias para poder comparar elementos entre sí (Aznar & Guijarro, 2012), ajustando los valores medidos en diferentes escalas hacia una escala común.

Tabla 1. Normalización por la suma. Fuente Autores.

Información de entrada Determinística $x_{ij} \rightarrow m_{ij}$
$m_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}}$

Si se presentan valores negativos en las evaluaciones de alternativas respecto a un criterio, antes de realizar la normalización por suma, deberá sumarse una constante a cada una de las evaluaciones del criterio, de forma tal que se vuelvan mayores o iguales que cero.

Tabla 2. Normalización por el Rango. Fuente Autores.

Información de entrada Determinística $x_{ij} \rightarrow m_{ij}$	
Criterio asociado a un Beneficio	Criterio asociado a un Costo
$m_{ij} = \frac{x_{ij} - min_j x_{ij}}{max_j x_{ij} - min_j x_{ij}}$	$m_{ij} = \frac{max_j x_{ij} - x_{ij}}{max_j x_{ij} - min_j x_{ij}}$

Tabla 3. Normalización Lineal. Basado en (Bazzazi et al., 2011).

	Información de Entrada		
	Determinística $x_{ij} \rightarrow m_{ij}$	De Intervalos $[{x_{ij}}^L, {x_{ij}}^U] \rightarrow [{m_{ij}}^L, {m_{ij}}^U]$	Números triangulares Difusos $[{x_{ij}}^L, {x_{ij}}^M, {x_{ij}}^U] \rightarrow [{m_{ij}}^L, {m_{ij}}^M, {m_{ij}}^U]$
Criterio asociado a un Beneficio	$m_{ij} = \frac{x_{ij}}{max_j x_{ij}}$ $1 \leq i \leq m,$ $1 \leq j \leq n$	${m_{ij}}^L = \frac{{x_{ij}}^L}{max_j {x_{ij}}^U}$ ${m_{ij}}^U = \frac{{x_{ij}}^U}{max_j {x_{ij}}^U}$ $(1 \leq i \leq m, j \in I_1)$	$m_{ij}^L = \frac{x_{ij}^L}{max_j x_{ij}^U}$ $m_{ij}^M = \frac{x_{ij}^M}{max_j x_{ij}^U}$ $m_{ij}^U = \frac{x_{ij}^U}{max_j x_{ij}^U}$ $(1 \leq i \leq m, j \in I_1)$
Criterio asociado a un Costo	$m_{ij} = \frac{min_j x_{ij}}{x_{ij}}$ $1 \leq i \leq m,$ $1 \leq j \leq n$	${m_{ij}}^L = \frac{min_j {x_{ij}}^L}{{x_{ij}}^U}$ ${m_{ij}}^U = \frac{min_j {x_{ij}}^L}{{x_{ij}}^L}$ $(1 \leq i \leq m, j \in I_2)$	$m_{ij}^L = \frac{min_j x_{ij}^L}{x_{ij}^U}$ $m_{ij}^M = \frac{min_j x_{ij}^L}{x_{ij}^M}$ $m_{ij}^U = \frac{min_j x_{ij}^L}{x_{ij}^L}$ $(1 \leq i \leq m, j \in I_2)$

Tabla 4. Normalización Vectorial. Fuente Autores.

Información de entrada Determinística $x_{ij} \rightarrow m_{ij}$
$m_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} (x_{ij})^2}}$

2.3.1 Métodos de ponderación de criterios

En un proceso de toma de decisiones la priorización de las distintas alternativas se realiza en función de una serie de criterios, una vez elegidos estos criterios, el siguiente paso debe ser definir la ponderación o grado de importancia de cada uno de ellos. A continuación, se describen los métodos considerados como opciones para la ponderación de criterios en el modelo propuesto.

2.3.1.1 Método CRITIC

El método CRITIC (CRiteria Importance Through Intercriteria Correlation) fue propuesto por Diakoulaki, Mavrotas y Papayannakis en 1995.

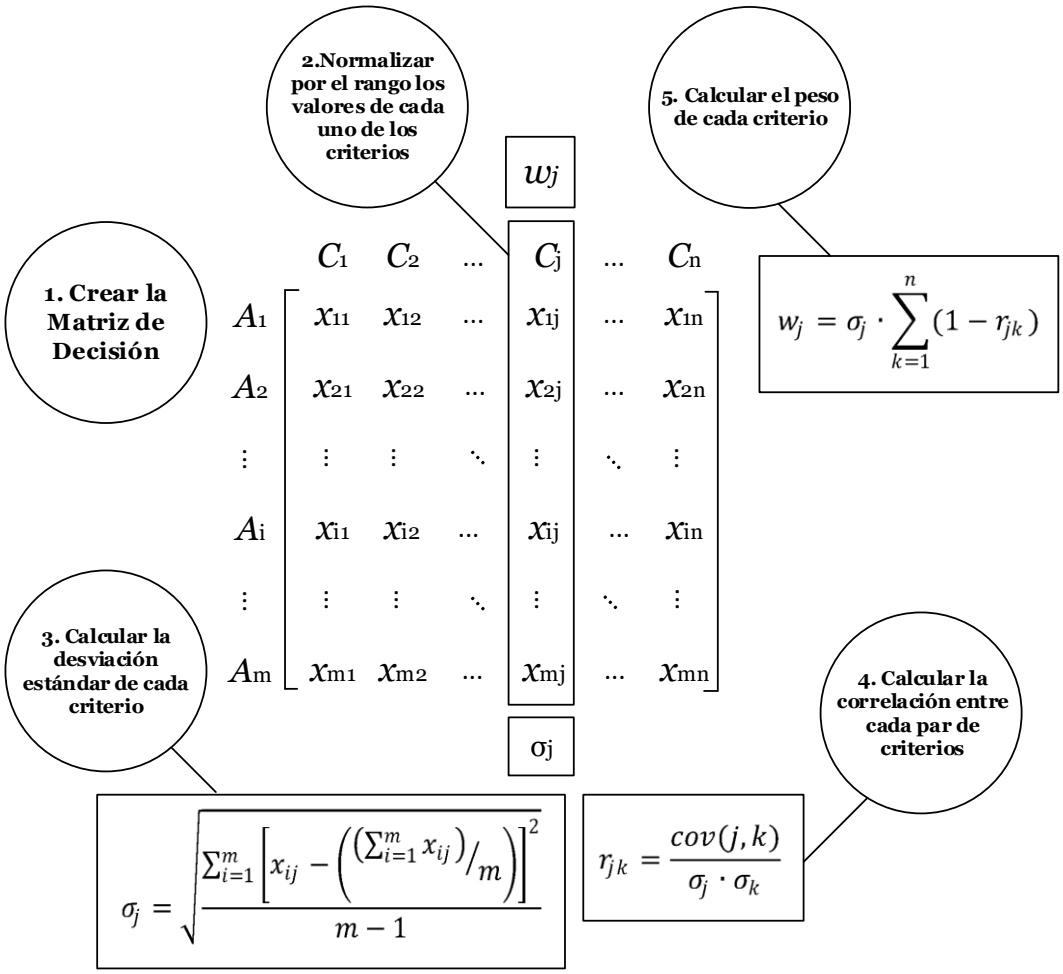


Figura 9. Método CRITIC. Fuente autores.

El peso de un criterio es tanto mayor cuanta mayor sea su varianza (mayor desviación típica), y cuanta mayor información diferente a la de los otros criterios aporte (menor coeficiente de correlación entre criterios) (Aznar & Guijarro, 2012).

2.3.1.2 Método de entropía

Este método fue propuesto por Zeleny en 1982. Parte del supuesto de que la importancia relativa de un criterio debe ser proporcional a la cantidad de información intrínsecamente aportada por el conjunto de las alternativas respecto a dicho criterio.

Cuanto mayor diversidad haya en las evaluaciones (valores) de las alternativas, mayor importancia deberá tener dicho criterio en la decisión final, ya que posee mayor poder de discriminación entre las alternativas (Aznar & Guijarro, 2012).

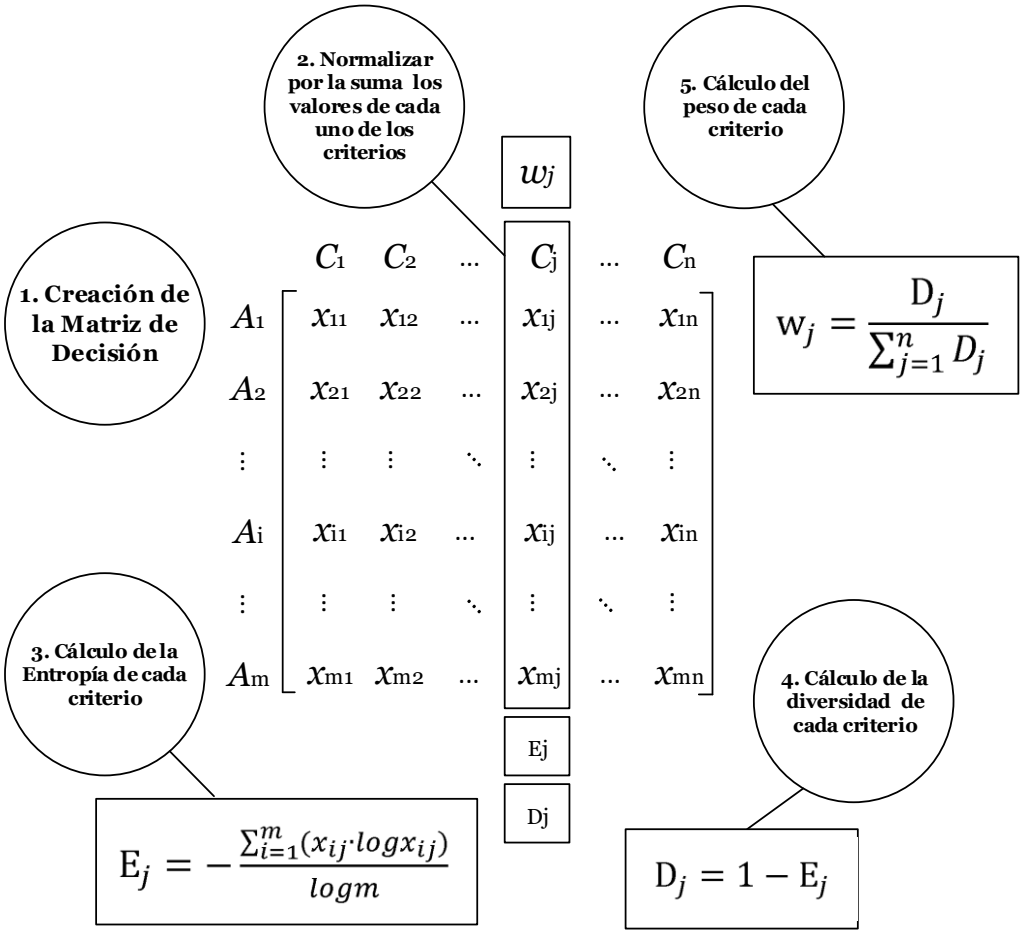


Figura 10. Método de entropía. Fuente autores.

El método mide la diversidad de un criterio, a través de la entropía. La entropía calculada es tanto mayor cuanto más similares son las evaluaciones de las alternativas consideradas(Aznar & Guijarro, 2012).

2.3.1.3 Método de Ordenación simple

El método de ordenación simple es el método más sencillo de aplicar. Su utilización se justifica cuando se parte de una situación con escasa información (Aznar & Guijarro, 2012).

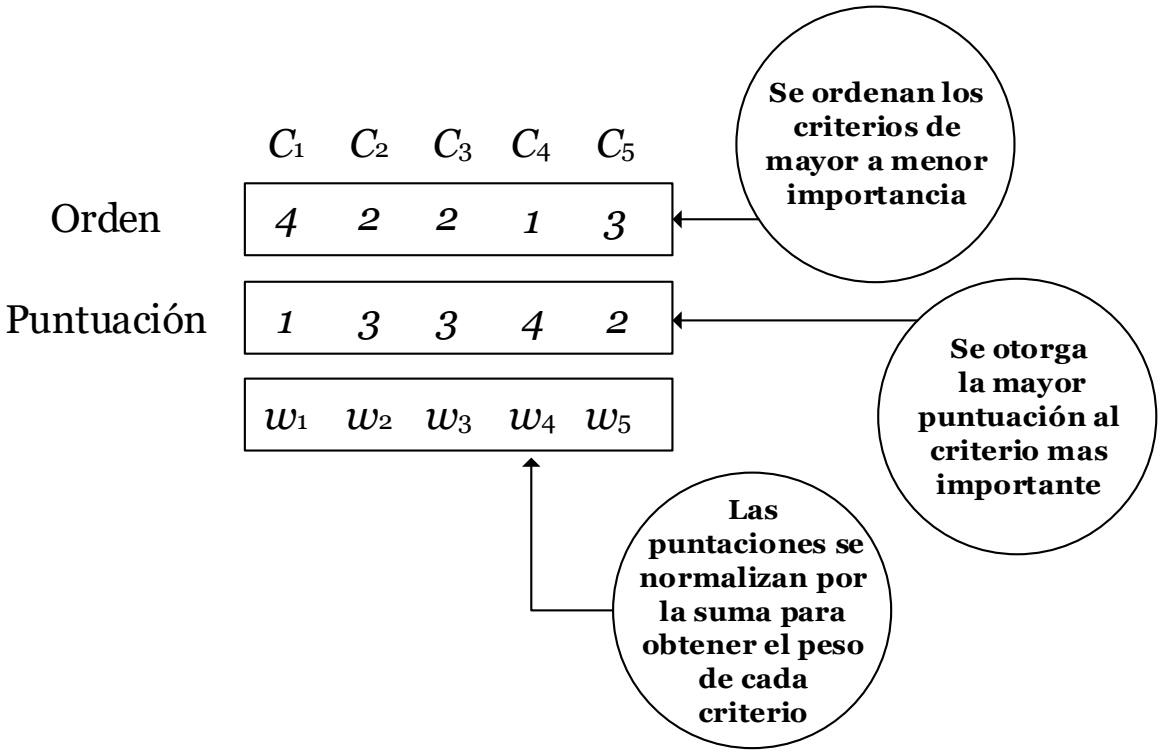


Figura 11. Método de Ordenación Simple. Fuente autores.

Las puntuaciones son definidas arbitrariamente por el tomador de decisiones. (Edwards, 1977) propuso asignarle 10 puntos al criterio de menor importancia, posteriormente elegir el siguiente criterio menos importante, asignarle más puntos, y así sucesivamente, reflejando su importancia relativa.

2.3.1.4 Proceso de jerarquía analítica, AHP (Analytic Hierarchy Process)

El Proceso de Jerarquía Analítica fue postulado por Tomas Saaty en 1980.

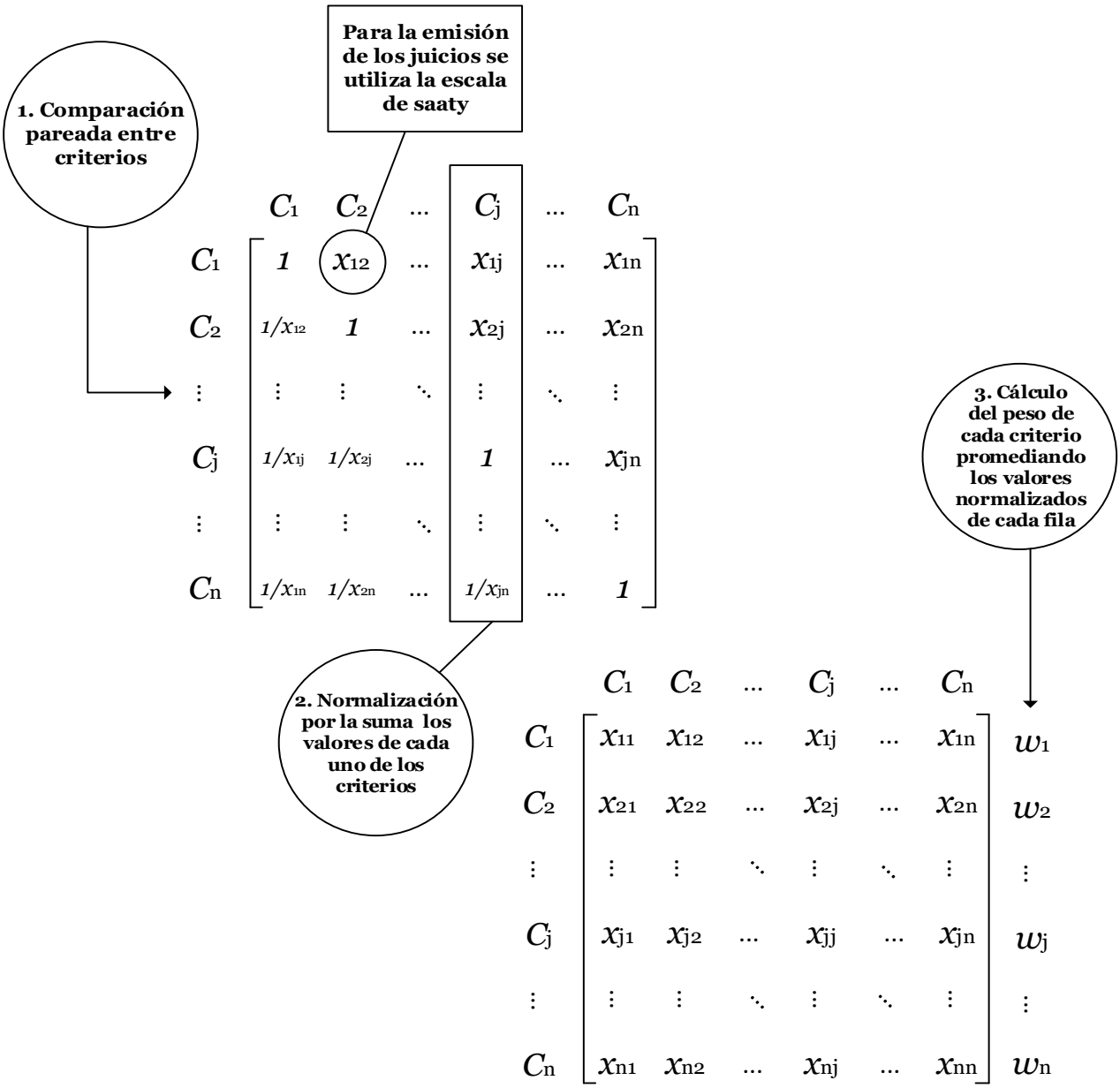


Figura 12. Método APH para ponderación de criterios, fuente autores.

La escala fundamental del AHP (T. L. Saaty, 2004b) es una escala de números absolutos utilizada para responder una pregunta básica en cada una de las comparaciones pareadas: ¿Cuántas veces es más dominante un elemento que otro con respecto a un determinado criterio o atributo?

En general, las aplicaciones AHP poseen tres formas diferentes de enmarcar la comparación por pares:

La primera es preguntar cuál de los dos elementos es más dominante o importante con respecto a un atributo o criterio, la segunda es preguntar cuál es el resultado más probable y la tercera es preguntar qué elemento es preferido con respecto a un atributo, reconociendo que la preferencia es completamente subjetiva y depende de los caprichos y gustos o aversiones del individuo (T. L. Saaty, 2004b).

El proceso de llevar cabo la asignación de estos pesos requiere de opiniones o juicios de valor que en problemas complejos solo pueden ser dadas por expertos en el tema.

Luego de encontrar los pesos se realiza el cálculo de la razón de consistencia, la cual permite comprobar cuando los juicios pueden estar sesgados o son incongruentes. Los juicios emitidos deberán ser revisados y modificados hasta que el nivel de inconsistencia sea aceptable (T. L. Saaty, 1999).

"La inconsistencia debe ser lo suficientemente grande como para permitir un cambio en nuestra comprensión coherente, pero lo suficientemente pequeña como para permitir adaptar nuestras viejas creencias a la nueva información. Esto significa que la inconsistencia debe ser precisamente un orden de magnitud menos importante que la consistencia, o simplemente el 10% de la preocupación total con la medición consistente. Si fuera más grande, interrumpiría la medición consistente y, si fuera más pequeño, contribuiría de manera insignificante al cambio en la medición" (T. L. Saaty, 2004b).

Matriz de comparación pareada sin normalizar

Vector de prioridades globales

Vector C

$$\begin{bmatrix} 1 & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1n} \\ 1/x_{12} & 1 & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/x_{1j} & 1/x_{2j} & \dots & 1 & \dots & x_{jn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/x_{1n} & 1/x_{2n} & \dots & 1/x_{jn} & \dots & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_j \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_j \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix}$$

1. Cálculo del vector C

3. Cálculo del índice de consistencia (*CI*)

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{j=1}^{n} d_j}{n} \qquad CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1}$$

Vector D

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_j \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix}$$

2. Cálculo del vector D

$$d_j = \frac{c_j}{w_j}$$

Los juicios emitidos deben ser revisados si CR> 0,1

4. Cálculo de la Razón de consistencia (*CR*)

$$CR = \frac{CI}{Consistencia\ aleatoria}$$

Tamaño de la matriz (n)	3	4	5	6	7	8	9	10
Consistencia aleatoria	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Figura 13. cálculo de la razón de consistencia. Fuente autores.

Dependiendo del número de jueces que aplicarán el método se pueden considerar los siguientes escenarios:

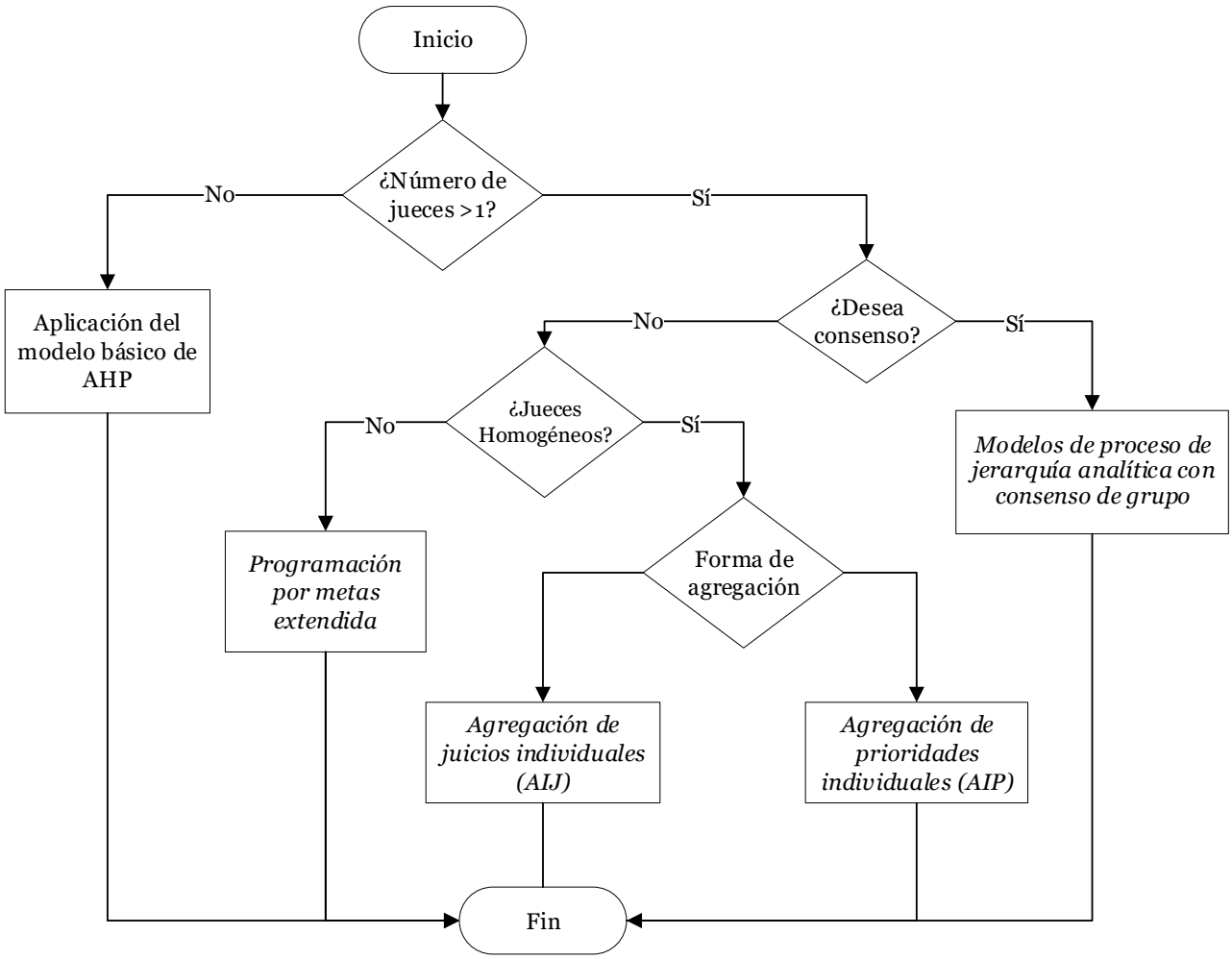


Figura 14. Agregación de juicios en AHP. Fuente autores.

1. Los jueces deben acordar entre ellos y esto necesariamente implica interdependencia y acuerdo.
2. Los jueces proporcionan sus valoraciones de forma independiente y no pueden llevar a cabo discusiones entre ellos (Dong & Saaty, 2014).

Los distintos expertos que pueden intervenir en una la emisión de juicios pueden ser de dos tipos (Aznar & Guijarro, 2012):

Expertos homogéneos: Son expertos integrantes de un grupo y que tienen entre ellos una serie de coincidencias como pueden ser la formación, el área de trabajo profesional, la finalidad de su trabajo, etc. Y que normalmente producen opiniones bastante homogéneas.

Expertos no homogéneos: Son aquellos expertos integrantes de un grupo cuya visión del valor de los activos es distinto, por su formación, por sus condicionantes políticos, etc. Y que como resultado pueden llegar a producir resultados bastante divergentes.

Existen dos formas de agregar los juicios individuales en un grupo de expertos homogéneo:

1. *Agregación de prioridades individuales (AIP)*, que transforma vectores de prioridad individuales en un vector de prioridad de grupo.

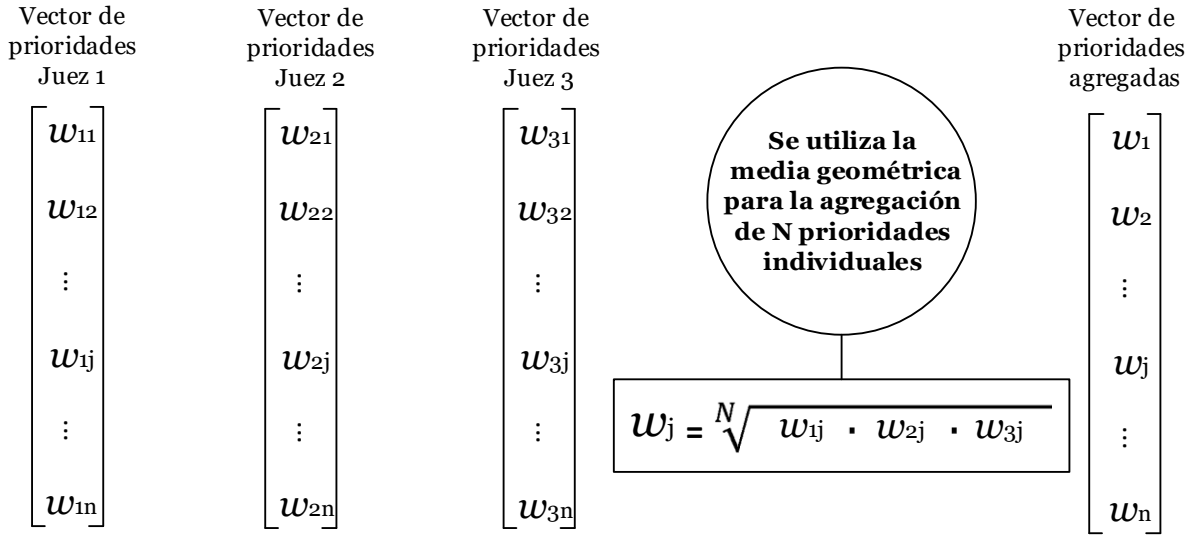


Figura 15. Agregación de prioridades individuales (AIP). Fuente autores.

2. *Agregación de juicios individuales (AIJ)*, que transforma las matrices de comparación por pares individuales (PCM) en un PCM grupal del cual derivan las prioridades del grupo.

Matriz de comparación pareada juez 1

$$\begin{array}{c} \\ C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_j \\ \vdots \\ C_n \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1n} \\ 1/x_{12} & 1 & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/x_{1j} & 1/x_{2j} & \dots & 1 & \dots & x_{jn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/x_{1n} & 1/x_{2n} & \dots & 1/x_{jn} & \dots & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

Matriz de comparación pareada juez 2

$$\begin{array}{c} \\ C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_j \\ \vdots \\ C_n \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & y_{12} & \dots & y_{1j} & \dots & y_{1n} \\ 1/y_{12} & 1 & \dots & y_{2j} & \dots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/y_{1j} & 1/y_{2j} & \dots & 1 & \dots & y_{jn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/y_{1n} & 1/y_{2n} & \dots & 1/y_{jn} & \dots & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

Matriz de comparación pareada agregada

$$\begin{array}{c} \\ C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_j \\ \vdots \\ C_n \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & z_{12} & \dots & z_{1j} & \dots & z_{1n} \\ 1/z_{12} & 1 & \dots & z_{2j} & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/z_{1j} & 1/z_{2j} & \dots & 1 & \dots & z_{jn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/z_{1n} & 1/z_{2n} & \dots & 1/z_{jn} & \dots & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

Se utiliza la media geométrica para la agregación de N juicios individuales

$$z_{jn} = \sqrt[N]{x_{jn} \cdot y_{jn}}$$

Figura 16. Agregación de juicios individuales (AIJ). Fuente autores.

En un problema grupal de toma de decisiones, la consistencia del PCM grupal está relacionada con la consistencia individual. Si se puede asegurar que cada tomador de decisiones tiene una consistencia aceptable, el juicio del grupo será de una consistencia aceptable (Dong & Saaty, 2014).

En un grupo de expertos no homogéneo una vez definidas las matrices y los vectores propios de cada experto se pueden agrupar por afinidad en la ponderación y dentro de cada grupo llegar a un vector agregado mediante la media geométrica. Agrupadas ya las distintas opiniones representadas por distintos vectores propios agregados se realiza una segunda agregación de los distintos grupos mediante *Programación por metas extendida*, que permite conocer cuál es la solución que más se acerca a la opinión de todos los grupos y también determinar otras soluciones más cercanas a la opinión de cada grupo(Linares & Romero, 2002) (Reyna & Cardells, 1999).

La determinación de la importancia del peso de los que toman las decisiones (ponderaciones) depende de criterios tales como experiencia, experticia, desempeño previo, etc. En algunos casos, sin embargo, es difícil obtener este tipo de evaluación. En ese caso, se puede usar el mismo peso para una solución aproximadamente óptima de un problema de minimización de incompatibilidad de cada individuo a partir de un juicio grupal representativo (Dong & Saaty, 2014).

Modelo de proceso de jerarquía analítica con consenso de grupo

La búsqueda del *consenso* generalmente se define como un proceso interactivo con varias rondas de negociación, en el que un moderador sugiere a los responsables de la toma de decisiones que actualicen sus juicios. El moderador no participa en la discusión, pero supervisa y lidera la interacción (Dong & Saaty, 2014).

Como el consenso total y la coincidencia de los juicios numéricos, es difícil de lograr. Saaty introdujo una medida de consenso, teniendo en cuenta que un PCM pertenece a una escala de relación absoluta y, por lo tanto, también proporcional. La proximidad de dos PCM puede medirse utilizando un índice de compatibilidad (Dong & Saaty, 2014).

2.3.1.5. Ponderación Compromiso de Criterios

Mientras que los métodos de Entropía y CRITIC proporcionan una evaluación dinámica y objetiva de la preferencia de un decisor respecto a un criterio en relación con el proceso de toma de decisiones, los métodos de ponderación a priori como AHP y Ordenación Simple determinan la importancia de un criterio de forma estática e independiente del proceso de toma de decisiones.

En situaciones donde un decisor tiene una ponderación subjetiva a priori para un criterio, una ponderación compromiso, w_j^0, que toma en cuenta tanto la preferencia subjetiva de un decisor λ_j como una ponderación objetiva w_j se calcula de la siguiente manera (Bazzazi et al., 2011):

$$w_j^0 = \frac{\lambda_j w_j}{\sum_{j=1}^{n} \lambda_j w_j}$$

2.3.2 Métodos para la valoración de alternativas

A continuación, se describen cada uno de los métodos multicriterio discretos considerados como opciones para la valoración de alternativas en el modelo propuesto.

2.3.2.1 Proceso de jerarquía analítica, AHP (Analytic Hierarchy Process)

AHP es un método basado en rankings que permite descomponer un problema no estructurado y complejo mediante la construcción de un orden jerárquico, valorando numéricamente la importancia relativa de cada alternativa en función de cada uno de los criterios a considerar, estos juicios son sintetizados para determinar que alternativas tienen mayor prioridad.

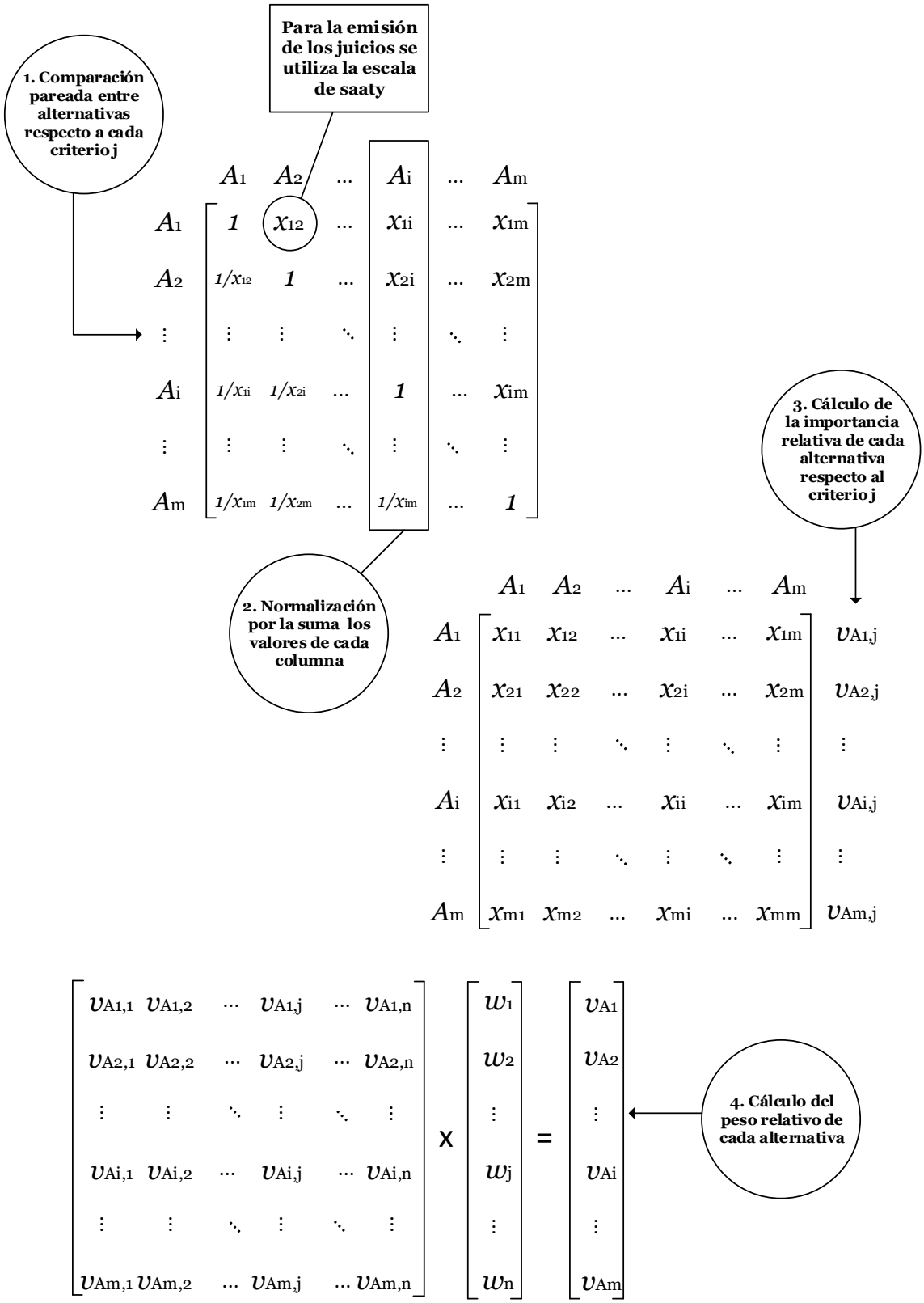


Figura 17. Método AHP para la valoración de alternativas. Fuente autores.

Para llevar a cabo la valoración de las alternativas se requiere primero calcular el peso de cada criterio como se expuso anteriormente. Las nociones del cálculo de la consistencia, agrupación de juicios o prioridades individuales se extienden a la valoración de alternativas.

AHP se ha aplicado a incontables áreas que comprenden contabilidad, finanzas, ventas, planificación de recursos energéticos, selección de microcomputadoras, sociología, arquitectura y ciencias políticas. AHP se ha convertido en una herramienta de decisión popular para ayudar a las personas a lidiar con problemas de decisión complejos que involucran factores tangibles e intangibles (Dodgson, Spackman, Pearman, & Phillips, 2009).

El método ha recibido algunas críticas, dentro de las cuales se destacan (Winston, 1991):

1. El método requiere que quien toma decisiones tenga una función de valor aditiva. Así, antes de usar el proceso se debe comprobar que quien toma decisiones crea que los objetivos sean mutua y preferencialmente independientes.
2. Es arbitraria la escala de nueve puntos para medir preferencias. (los valores siempre deben estar entre 1 y 9).
3. Si se agrega otra alternativa, las clasificaciones de las alternativas originales pueden cambiar. Poco flexible.

2.3.2.2 Proceso Analítico en Red, ANP (Analytic Network Process).

El proceso analítico en red fue postulado por Tomas Saaty en 1996 como una generalización del método AHP. La característica esencial de ANP, a diferencia de AHP, es que permite incluir relaciones de interdependencia y realimentación entre elementos del sistema.

El proceso de red analítica (ANP) es una teoría general de medición relativa utilizada para derivar escalas de relación de prioridad compuesta de escalas de razón individuales que representan medidas relativas de la influencia de los elementos que interactúan con respecto a los criterios de control. A través de su supermatriz, cuyos elementos son a su

vez matrices de prioridades, el ANP captura el resultado de la dependencia y la retroalimentación dentro y entre los grupos de elementos (T. L. Saaty, 1999).

La representación gráfica de ANP a diferencia de AHP ya no se realiza mediante el clásico sistema jerárquico, sino mediante una red. La red de ANP está formada por componentes, nodos o clusters y cada uno de ellos comprende una serie de elementos. Las relaciones entre componentes, nodos o clusters se llama interdependencias y las relaciones entre elementos dentro de un nodo, realimentación (Aznar & Guijarro, 2012).

Procedimiento ANP:

1. Identificación de los elementos de la red. Alternativas, criterios y construcción de la Red.

Determine las jerarquías de control, incluidos sus criterios para comparar los componentes del sistema y sus subcriterios para comparar los elementos del sistema. Una jerarquía para los beneficios, una segunda para los costos, una tercera para las oportunidades y una cuarta para los riesgos. Si en algunos casos, una jerarquía no se aplica porque sus criterios no son importantes, se omite esa jerarquía. A veces, las comparaciones se hacen simplemente en términos de beneficios, oportunidades, costos y riesgos en conjunto sin utilizar criterios y subcriterios (T. L. Saaty, 1999).

2. Análisis de la red de influencias. Matriz de dominación interfactorial.

Determine el enfoque que desea seguir en el análisis de cada grupo o elemento, siendo influenciado por otros grupos y elementos, o influyendo en otros grupos y elementos con respecto a un criterio. El sentido (ser influenciado o influenciado) debe aplicarse a todos los criterios para las jerarquías de control (T. L. Saaty, 1999).

3. Cálculo de las prioridades entre elementos. Supermatriz Original.

Conocidas todas las influencias se determina la cuantificación de estas, mediante el planteamiento de las matrices de comparación pareada correspondientes (T. L. Saaty, 2004c).

4. Cálculo de las prioridades entre clusters. Supermatriz Ponderada.

Normalmente la supermatriz original no será una matriz estocástica (una matriz en la que todas sus columnas sumen uno). Para transformarla en estocástica se plantea una matriz de comparación pareada con los clusters correspondientes para determinar la ponderación de estos. Multiplicando los pesos de los elementos de cada clúster, por la ponderación del clúster (Aznar & Guijarro, 2012; T. L. Saaty, 2004a).

5. Cálculo de la Supermatriz límite.

Se multiplica la Supermatriz ponderada por ella misma tantas veces como haga falta, hasta que todas sus columnas sean iguales. Sus valores indicarán la prioridad global de los elementos de la red (Aznar & Guijarro, 2012; T. L. Saaty, 2004c).

$$
\begin{array}{cc}
 & \begin{array}{cccccc} \text{Clúster de Criterios} & & & & & \end{array} \\
 & \begin{array}{cccccc} C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_n \end{array} \\
\begin{array}{c} \\ C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_j \\ \vdots \\ C_n \end{array}
\begin{array}{c} \text{Clúster de Criterios} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array}
\begin{bmatrix}
x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1n} \\
x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2n} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
x_{j1} & x_{j2} & \dots & x_{jj} & \dots & x_{jn} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nj} & \dots & x_{nn}
\end{bmatrix}
\begin{array}{c} \text{Clúster de Alternativas} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array}
\begin{bmatrix}
y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1i} & \dots & y_{1m} \\
y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2i} & \dots & x_{2m} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
y_{j1} & y_{j2} & \dots & y_{ji} & \dots & y_{jm} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
y_{n1} & y_{n2} & \dots & y_{ni} & \dots & y_{nm}
\end{bmatrix} \\
\begin{array}{c} \\ A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_m \end{array}
\begin{array}{c} \text{Clúster de Alternativas} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array}
\begin{bmatrix}
w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1j} & \dots & w_{1n} \\
w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2j} & \dots & w_{2n} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
w_{i1} & w_{i2} & \dots & w_{ij} & \dots & w_{in} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
w_{m1} & w_{m2} & \dots & w_{mj} & \dots & w_{mn}
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1i} & \dots & z_{1m} \\
z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2i} & \dots & z_{2m} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
z_{i1} & z_{i2} & \dots & z_{ii} & \dots & z_{im} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
z_{m1} & z_{m2} & \dots & z_{mi} & \dots & z_{mm}
\end{bmatrix}
\end{array}
$$

Figura 18. Supermatriz Original, para un clúster de criterios y un clúster de alternativas, Fuente autores.

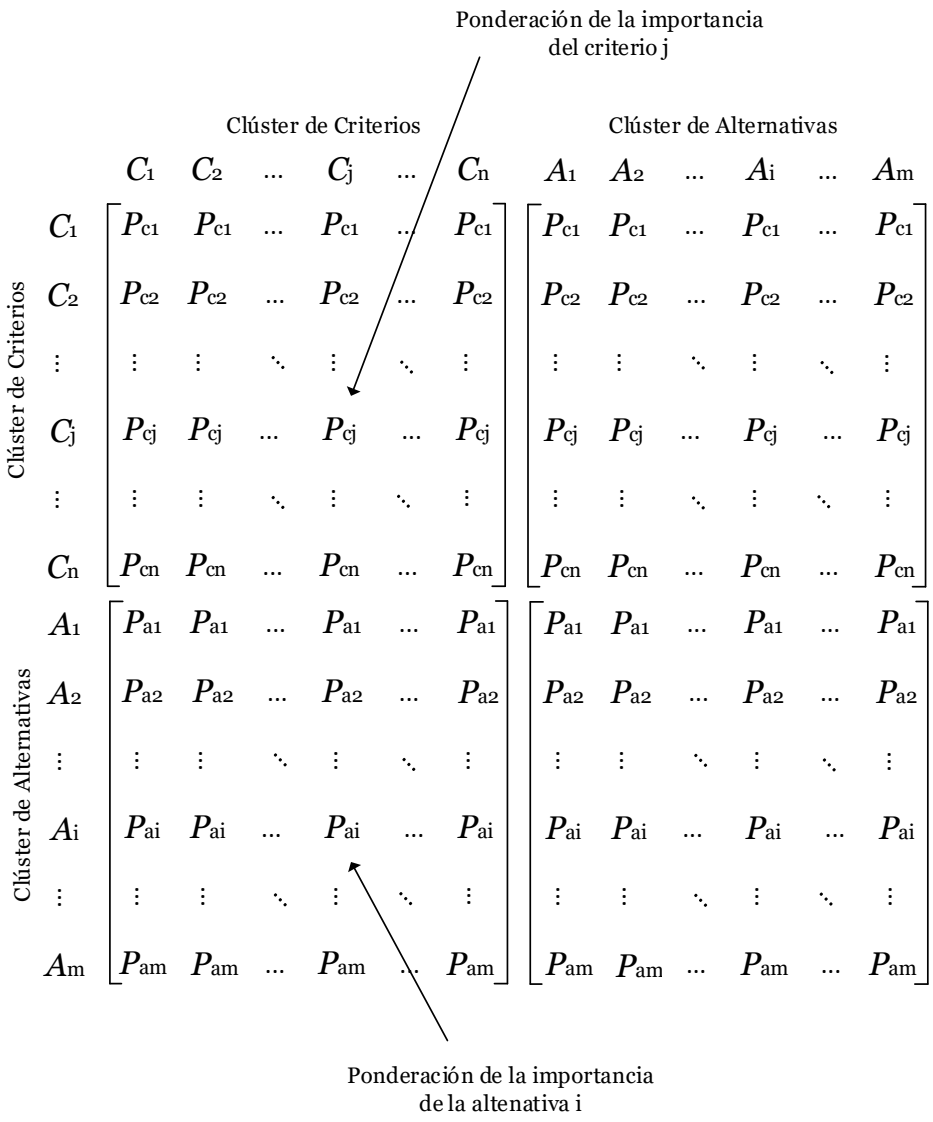


Figura 19. Supermatriz Limite, para un clúster de criterios y un clúster de alternativas. Fuente autores.

El ANP proporciona un marco general para tratar las decisiones sin hacer suposiciones sobre la independencia de los elementos de nivel superior de los elementos de nivel inferior y sobre la independencia de los elementos dentro de un nivel (T. L. Saaty, 1999).

El ANP utiliza la idea de una jerarquía de control o una red de control para tratar diferentes criterios, lo que eventualmente conduce al análisis de beneficios, oportunidades, costos y riesgos (T. L. Saaty, 1999).

El ANP es una estructura no lineal que trata con fuentes, ciclos y sumideros, prioriza no solo elementos sino también grupos o grupos de elementos como a menudo es necesario en el mundo real (T. L. Saaty, 1999).

Para sintetizar las prioridades limitantes en modelos ANP BOCR (méritos: Beneficios, Oportunidades, Costos y Riesgos) se pondera cada vector de límite idealizado por el peso de su criterio de control, agregando los vectores resultantes, generando cuatro vectores, uno para cada uno de los cuatro méritos, se obtiene una respuesta que involucra valores de razón de los méritos mediante la relación BO / CR para cada una de las alternativas.

Se determinan los criterios estratégicos y sus prioridades para calificar la alternativa mejor clasificada (ideal) para cada uno de los cuatro méritos de a uno por vez. Se normalizan los cuatro índices así obtenidos y se utilizan para calcular la síntesis global de los cuatro vectores. Para cada alternativa, se resta la suma de los costos y riesgos ponderados de la suma de los beneficios y oportunidades ponderados (T. L. Saaty, 2004a)

El método DEMATEL es una herramienta que se aplica en el campo de toma de decisiones multicriterio para visualizar y construir interrelaciones entre criterios y subcriterios. DEMATEL consta de los siguientes pasos:

1. Construcción de la matriz de influencia directa.
2. Normalización de la matriz de influenciada directa.
3. Encontrar la matriz de relación total.
4. Producción de un diagrama causal.
5. Obtención de la matriz de dependencia interna y el mapa de relación de impacto (IMR).

DEMATEL puede ser utilizado para identificar realimentaciones e interdependencias en la Red de ANP (Falatoonitoosi, Leman, Sorooshian, & Salimi, 2013).

2.3.2.3 Método SMART (Simple Multi-Atribute Rating Technique)

SMART es la forma más simple de los métodos MAUT. Fue propuesto por Edwards y Barron en 1977. El valor de clasificación de una alternativa se obtiene a través de la media algebraica ponderada de los valores de utilidad asociados con ella.

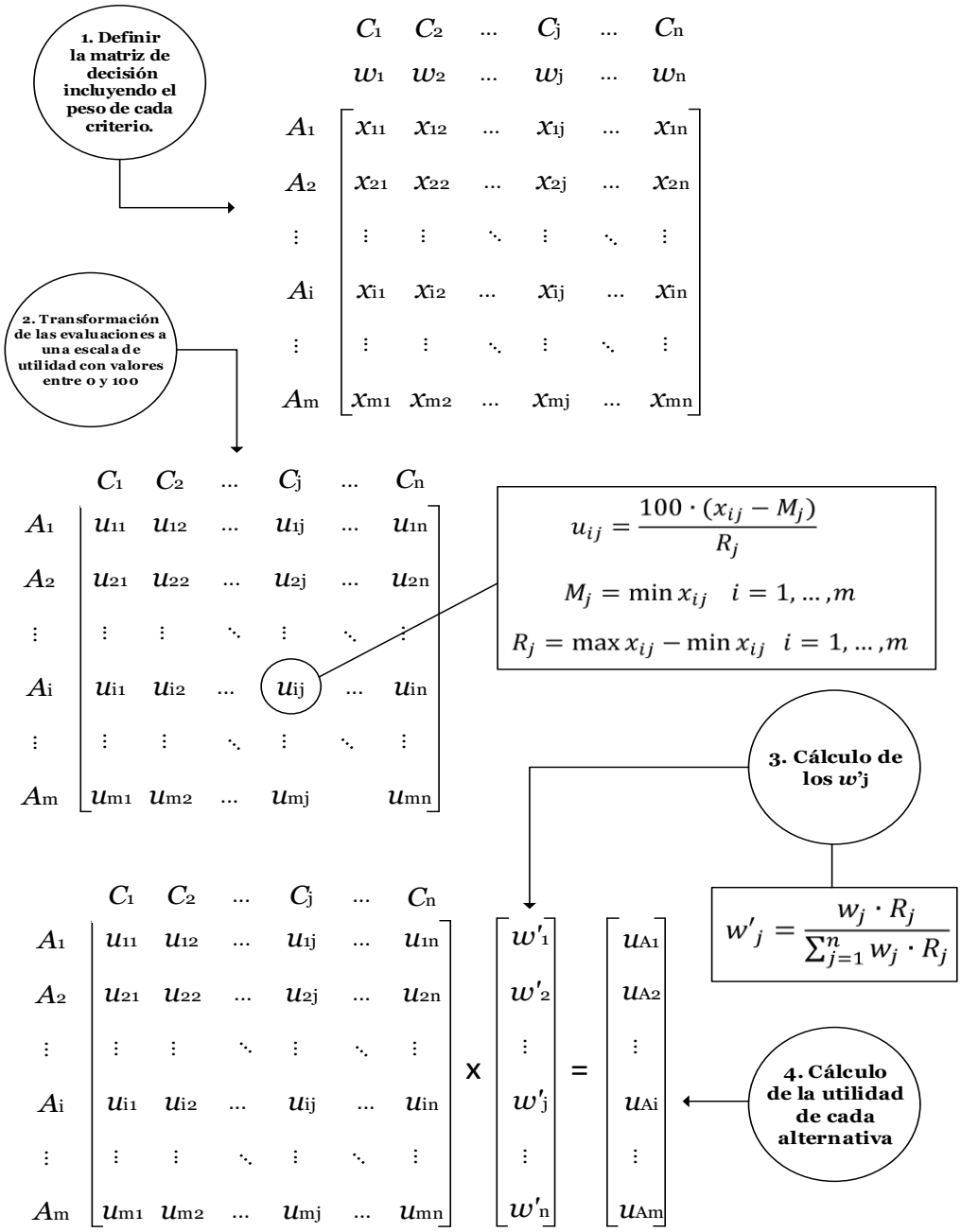


Figura 20. Método SMART. Fuente autores.

2.3.2.4 Método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)

El método TOPSIS fue propuesto por Chen and Hwang (1992).

1. Definir la Matriz de Decisión con los respectivos pesos de cada criterio.

$$
\begin{array}{c}
 \\ \\ A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_m
\end{array}
\begin{array}{c}
\begin{array}{cccccc} C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_n \end{array} \\
\begin{array}{cccccc} w_1 & w_2 & \dots & w_j & \dots & w_n \end{array} \\
\begin{bmatrix}
x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1n} \\
x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2n} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn}
\end{bmatrix}
\end{array}
$$

2. Normalizar la matriz de decisión de forma vectorial.

$$V_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m}(x_{ij})^2}} \quad \forall\, j = 1, \dots, n$$

$$
\begin{array}{c}
 \\ A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_m
\end{array}
\begin{array}{c}
\begin{array}{cccccc} C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_n \end{array} \\
\begin{bmatrix}
V_{11} & V_{12} & \dots & V_{1j} & \dots & V_{1n} \\
V_{21} & V_{22} & \dots & V_{2j} & \dots & V_{2n} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
V_{i1} & V_{i2} & \dots & V_{ij} & \dots & V_{in} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
V_{m1} & V_{m2} & \dots & V_{mj} & \dots & V_{mn}
\end{bmatrix}
\end{array}
$$

3. Calcular la matriz de decisión normalizada ponderada.

$$P_{ij} = V_{ij} * W_j \quad \forall\, i = 1, \dots, m$$

$$
\begin{array}{c}
 \\ A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_m
\end{array}
\begin{array}{c}
\begin{array}{cccccc} C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_n \end{array} \\
\begin{bmatrix}
P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1j} & \dots & P_{1n} \\
P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2j} & \dots & P_{2n} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
P_{i1} & P_{i2} & \dots & P_{ij} & \dots & P_{in} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
P_{m1} & P_{m2} & \dots & P_{mj} & \dots & P_{mn}
\end{bmatrix}
\end{array}
$$

3. Determinar la solución ideal positiva (PIS) y la solución anti-ideal negativa (NIS). A partir de los mejores y peores valores del conjunto de las alternativas, teniendo en cuenta si las funciones de criterio desean ser maximizadas o minimizadas.

$$
\begin{array}{cc}
 & \begin{array}{cccccc} C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_n \end{array} \\
\begin{array}{c} F_j \\ A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_m \end{array} &
\begin{array}{c} Min \\ P_{11} \\ P_{21} \\ \vdots \\ P_{i1} \\ \vdots \\ P_{m1} \end{array}
\begin{array}{c} Max \\ P_{12} \\ P_{22} \\ \vdots \\ P_{i2} \\ \vdots \\ P_{m2} \end{array}
\begin{array}{c} \dots \\ \dots \\ \dots \\ \ddots \\ \dots \\ \ddots \\ \dots \end{array}
\begin{array}{c} \dots \\ P_{1j} \\ P_{2j} \\ \vdots \\ P_{ij} \\ \vdots \\ P_{mj} \end{array}
\begin{array}{c} \dots \\ \dots \\ \dots \\ \ddots \\ \dots \\ \ddots \\ \dots \end{array}
\begin{array}{c} \dots \\ P_{1n} \\ P_{2n} \\ \vdots \\ P_{in} \\ \vdots \\ P_{mn} \end{array}
\end{array}
$$

$Max\ P_i$

$Min\ P_i$

$$
\begin{array}{cc}
\overline{D}_i^+ & \overline{D}_i^- \\
\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_j \\ \vdots \\ D_n \end{bmatrix} &
\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_j \\ \vdots \\ D_n \end{bmatrix}
\end{array}
$$

ALternativa Ideal	$\overline{A}_j^-$	P_{i1}	P_{22}	...	...	...	...
Alternativa Anti Ideal	$\overline{A}_j^+$	P_{11}	P_{i2}	...	...	...	...

4. Calcular las medidas de distancia

$$\overline{D}_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left(P_{ij} - \overline{A}_j^+\right)^2}$$

$$\overline{D}_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left(P_{ij} - \overline{A}_j^-\right)^2}$$

Distancias euclidianas

5. Determinar la proximidad relativa a la alternativa ideal

$$\overline{RS_i} = \frac{\overline{D}_i^-}{\overline{D}_i^+ + \overline{D}_i^-}$$

$$
\begin{array}{cc}
\overline{RS_i} & \\
\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_j \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} &
\begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 4 \end{bmatrix}
\end{array}
$$

6. Determinar el orden de preferencia de las alternativas (Ranking)

Empezando con el valor mas positivo hasta llegar al menor.

Figura 21. Método TOPSIS. Fuente autores.

El método TOPSIS se basa en una función de agregación que representa "la cercanía al ideal", que se originó en el método de programación compromiso. Determina una solución con la distancia más corta a la solución ideal y la mayor distancia a la solución ideal negativa(Opricovic & Tzeng, 2004).

El método TOPSIS usa la normalización vectorial. El valor normalizado podría ser diferente para diferentes unidades de evaluación (pesos) de un criterio particular. Una versión posterior del método TOPSIS utiliza la normalización lineal que no depende de la unidad de evaluación de un criterio (Opricovic & Tzeng, 2004, 2007).

La alternativa con la clasificación más alta para TOPSIS es la mejor en términos del índice de clasificación, sin embargo, esto no significa que esta alternativa sea la más cercana a la solución ideal (Opricovic & Tzeng, 2007; Young, Ting, & Ching, 1992)

Se ha postulado una extensión al método que permite determinar el peso de tomadores de decisiones en un entorno de decisión grupal, para ello definen la solución ideal positiva como el promedio de la decisión grupal. Por otro lado, la solución ideal negativa incluye dos partes: la solución ideal negativa izquierda y derecha que son las matrices mínimas y máximas de decisión grupal respectivamente (Yue, 2011).

Otra extensión del método TOPSIS permite determinar los pesos de los tomadores de decisiones y el orden de preferencia de las alternativas en problemas MAGDM, eliminando la perdida de información ocasionada por las agregaciones (Yue, 2011).

2.3.2.5 Método VIKOR (VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromiso Resenje)

El método VIKOR fue propuesto por Serafín Opricovic en 1990.

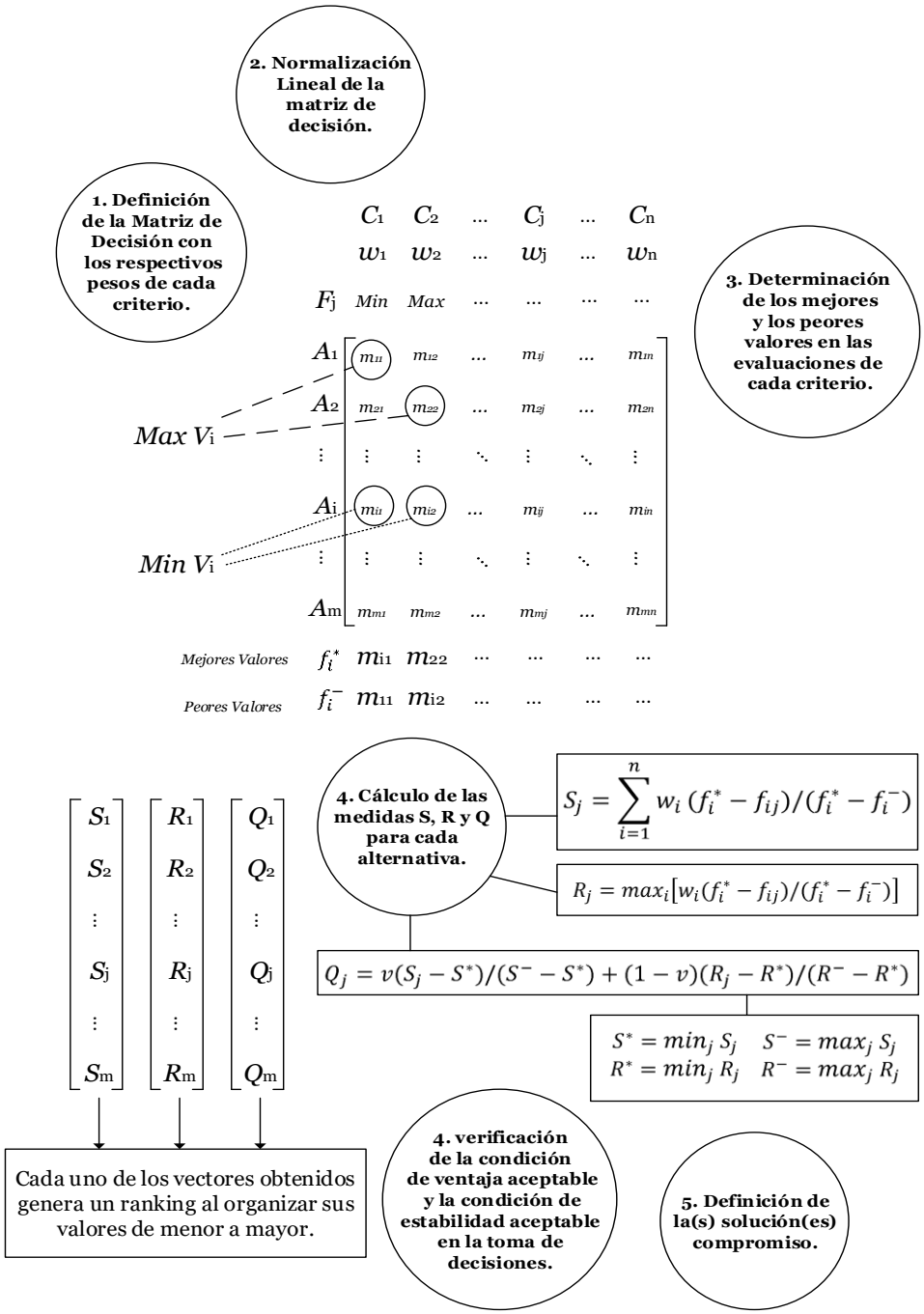


Figura 22. Método VIKOR. Fuente autores.

La aplicación de VIKOR implica que (Opricovic & Tzeng, 2007)**:**

- Una solución compromiso es aceptable para la resolución de conflictos.
- El responsable de la toma de decisiones está dispuesto a aprobar la solución más cercana al ideal.
- Existe una relación lineal entre cada función de criterio y la utilidad de un decisor.
- Los criterios son conflictivos y no conmensurables (unidades diferentes).
- Las alternativas se evalúan según todos los criterios establecidos (matriz de rendimiento).
- La preferencia del tomador de decisiones se expresa mediante pesos, dados o simulados.
- El método se puede iniciar sin participación interactiva de tomador de decisiones, pero este es el encargado de aprobar la solución final y se debe incluir su preferencia.
- La solución de compromiso propuesta (uno o más) tiene una tasa de ventaja.
- Un análisis de estabilidad determina los intervalos de estabilidad de peso.

El método VIKOR es una herramienta efectiva en situaciones donde el responsable de la toma de decisiones no puede o no sabe expresar sus preferencias hacia las alternativas. La solución de compromiso obtenida podría ser aceptada por el tomador de decisiones porque proporciona una utilidad máxima de grupo (representado por la alternativa con el min S) y un arrepentimiento individual mínimo (representado por la alternativa con el min R) (Opricovic & Tzeng, 2007).

La lista de clasificación de compromiso para un v (veto: importancia relativa de la utilidad máxima de grupo frente al mínimo arrepentimiento individual) dado se obtiene clasificando las alternativas en función de las medidas de Qj. La mejor alternativa, clasificada por Qj, es la que tiene el valor mínimo de Qj (Opricovic & Tzeng, 2007).

Se propone como una solución compromiso, a la alternativa mejor clasificada por la medida Qj, si se cumplen la condición de ventaja aceptable y la condición de estabilidad aceptable en la toma de decisiones. Si alguna de estas condiciones no se satisface debe proponerse un conjunto de soluciones compromiso (Opricovic & Tzeng, 2007).

2.3.2.6 Método PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations)

PROMETHEE (Método de Organización de Clasificación de Preferencias para Evaluaciones de Enriquecimiento) fue desarrollado por Jean-Pierre Brans y presentado por primera vez en 1982.

El método Posee las siguientes características (Brans & Mareschal, 2005):

Considera e integra en cada criterio un concepto básico de relación de graduación difusa mediante medidas de comparación por pares para alternativas a diferentes grados de relación entre sí.

Estos diferentes grados de relación se usan luego para configurar un pre orden parcial (PROMETHEE I), y/o un pre orden completo (PROMETHEE II).

Como las evaluaciones de cada criterio se expresan en sus propias unidades, los efectos de escalado se eliminan por completo. No es aceptable obtener conclusiones según las escalas en las que se expresan las evaluaciones.

PROMETHEE reduce tanto como sea posible el número de incomparabilidades. Cuando, para un procedimiento particular, todas las incomparabilidades son sistemáticamente retiradas, la información provista puede ser más cuestionable.

PROMETHEE evita los procedimientos de caja negra al incluir únicamente parámetros técnicos que tienen significado para el que toma las decisiones. El método proporciona información sobre la naturaleza conflictiva de los criterios y ofrece herramientas de sensibilidad para probar fácilmente diferentes conjuntos de pesos.

PROMETHEE permite crear criterios cualitativos con diferentes valores semánticos y es el propio tomador de decisiones, quien debe asignar valores numéricos a cada valor semántico. Esta es claramente una laguna importante que genera un alto grado de incertidumbre.

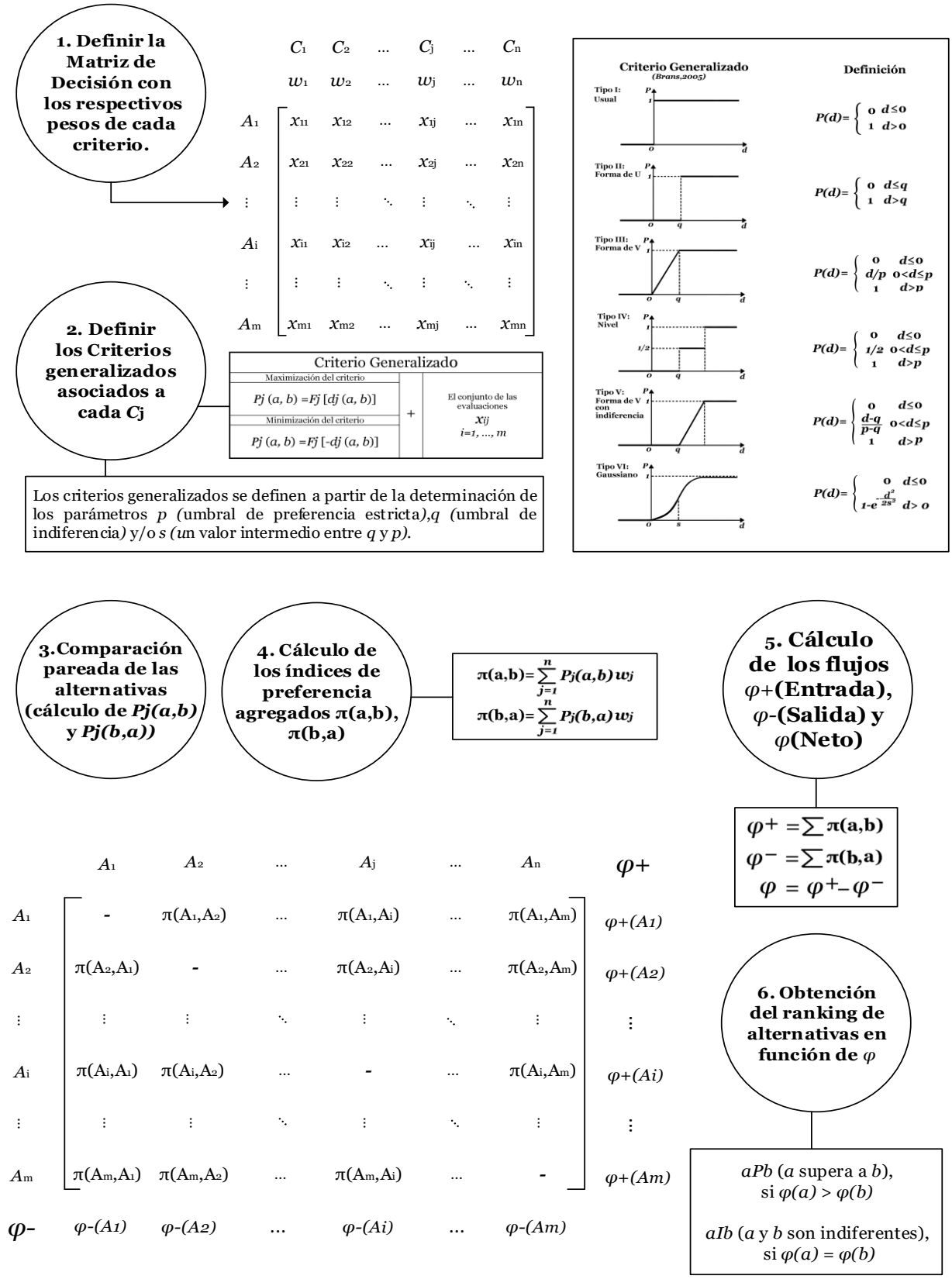


Figura 23. Método PROMETHEE II. Fuente autores.

Decision Lab constituye una de las implementaciones más actuales de las metodologías PROMETHEE y GAIA. Ha sido desarrollado por la compañía canadiense Visual Decision en cooperación con Jean-Pierre Brans y Bertrand Mareschal y sustituye al software PromCalc que anteriormente habían desarrollado estos últimos.

En 1988 se creó el módulo interactivo visual GAIA que proporciona una representación gráfica de apoyo a los métodos PROMETHEE. La representación en GAIA no deja de ser, en cierta medida, un analizador de inconsistencias que, al actualizarse en tiempo real, puede convertirse en un sistema de análisis de la robustez y la sensibilidad.

Los criterios generalizados (Brans & Mareschal, 2005; Gironés, Madrid, & Valls, 2008) se definen a partir de la determinación de los siguientes parámetros:

1. q es un umbral de indiferencia. Es el mayor valor de desvió entre los atributos de dos alternativas con respecto a un criterio por debajo del cual el que toma las decisiones considera que hay indiferencia.

2. p es un umbral de preferencia estricto. Es el valor más bajo de desvió entre los atributos de dos alternativas con respecto a un criterio por encima del cual el que toma las decisiones considera que hay una preferencia estricta.

3. s es un parámetro directamente relacionado con la desviación estándar de una distribución normal.

2.3.2.7 Método ZAPROS III (Closed Procedures near Reference Situations)

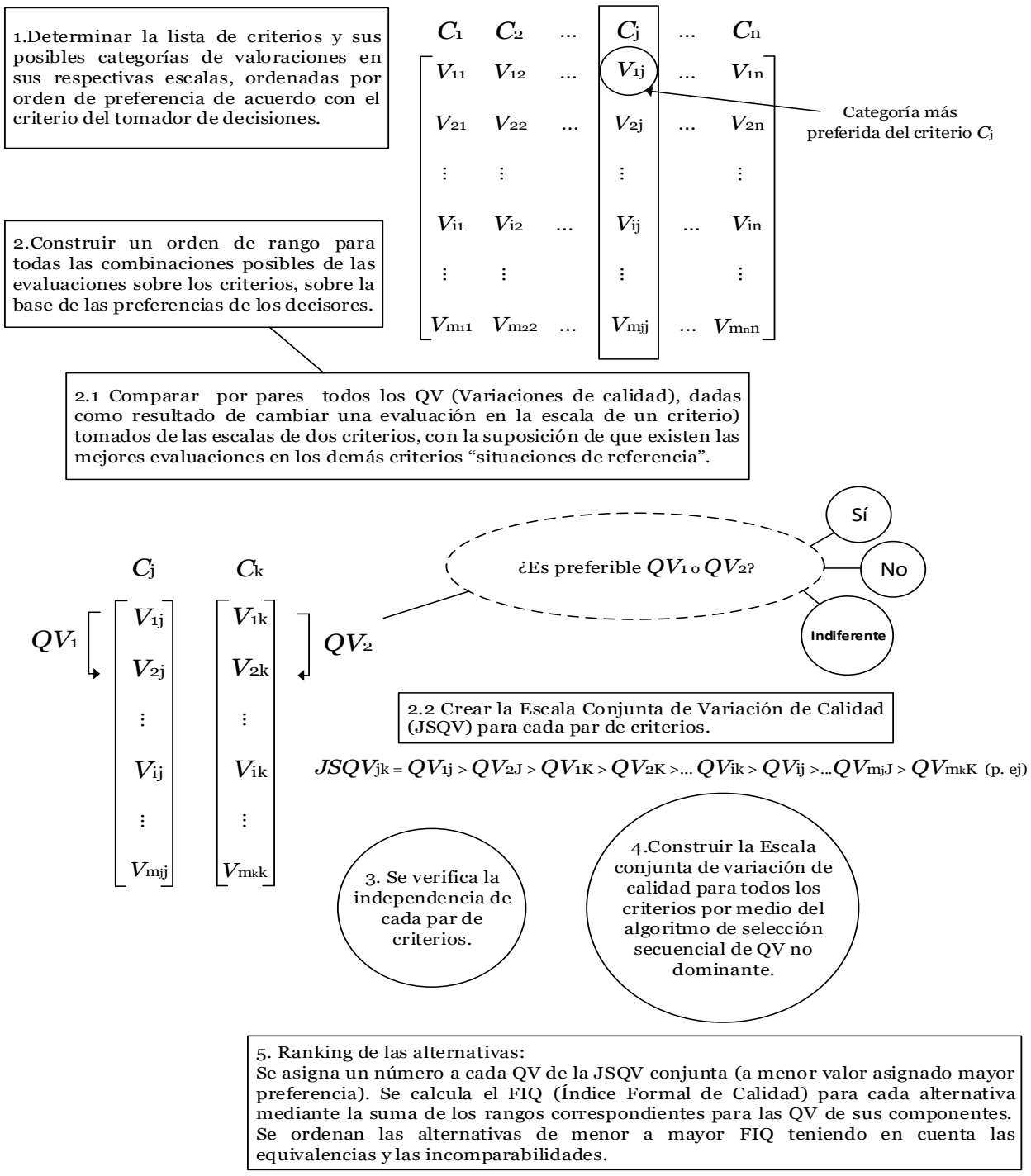


Figura 24. El método ZAPROS III. Fuente autores.

Métodos para la toma de decisiones verbales:

Los métodos pertenecientes al marco de decisión verbal (VDA) tienen como objetivo resolver los problemas de toma de decisiones de una manera más realista desde el punto de vista del tomador de decisiones. Los métodos cuantitativos pueden conducir a la pérdida de información cuando se trata de asignar medidas precisas a los valores verbales, sin embargo, la característica expuesta puede causar una disminución en la potencia de comparación del método, haciendo inevitables los casos de incomparabilidades entre las alternativas y conduciendo a un resultado insatisfactorio del problema(Larichev, 2001b) .

La ventaja de los métodos cualitativos sobre los cuantitativos es que todos los cuestionamientos hechos en el proceso para obtención de las preferencias se presentan en el lenguaje natural del tomador de decisiones. Además, las descripciones verbales se usan para medir los niveles de preferencia. Este procedimiento es psicológicamente válido, ya que respeta las limitaciones del sistema de procesamiento de información humana y está estructurado en la comprensión de que la mayoría de los problemas de toma de decisiones se pueden describir verbalmente (Larichev, 2001a).

ZAPROS fue propuesto por Larichev en 1978. Permite clasificar alternativas multicriterio en escenarios que involucran un conjunto bastante pequeño de criterios y valores de criterios, y un mayor número de alternativas (Tamanini & Pinheiro, 2011).

El método ZAPROS III se basa en la obtención de preferencias en torno a los valores que representan la distancia entre las evaluaciones de dos criterios. Es una evolución del método ZAPROS LM, que aplica una versión modificada del procedimiento, lo que lo hace más eficiente y consistente.

La obtención de preferencias se realiza de tal manera que una regla de decisión se puede estructurar antes de definir las alternativas. Esta característica hace que el método sea más genérico y se puedan incluir nuevas alternativas sin la necesidad de cambiar la escala de preferencias. El método presenta una considerable resistencia a los aportes contradictorios del decisor, siendo capaz de detectar y solicitar una solución a estos problemas.

Una desventaja del método radica en que el número de criterios y los valores de los criterios soportados son limitados, debido a que estos son responsables del crecimiento exponencial de las posibles alternativas al problema y por esta razón la información requerida en el proceso de obtención de preferencias también será mayor.

Al construir un JSQV para cada par de criterios, se requieren datos adicionales del responsable de la toma de decisiones. La información adicional se utiliza para crear el control de consistencia. Si en algún paso del algoritmo para la selección secuencial de QV no es posible encontrar el siguiente QV no dominado, existe una contradicción en las preferencias del tomador de decisiones. El algoritmo puede descubrir la respuesta contradictoria y demostrarla al responsable de la toma de decisiones para su corrección.

Es posible aceptar que la condición de independencia es verdadera si las "situaciones de referencia" no tienen influencia en las comparaciones hechas por el que toma las decisiones. Para los casos en que un par de criterios no son independientes por QV, es necesario cambiar la descripción verbal del problema y lograr la independencia.

El método ZAPROS puede ser aplicado en problemas con las siguientes características (Larichev, 2001b):

1) Se debe desarrollar una regla de decisión antes de la aparición de alternativas.

2) Hay una gran cantidad de alternativas.

3) Las evaluaciones de alternativas sobre los criterios solo podrían ser realizadas por seres humanos que desempeñan el papel de dispositivos de medición.

4) Los grados de calidad en las escalas de criterios son definiciones verbales que presentan valores subjetivos del tomador de decisiones.

Para el caso especial, en el cual se consideran solo dos criterios, no se requiere del uso de "situaciones de referencia". Es posible construir un JSQV y usarlo para una comparación de alternativas.

2.3.2.8 MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique)

Fue propuesto por Carlos A. Bana e Costa y Jean-Claude Vansnick en 1994. MACBETH es un método basado en la Teoría de la Utilidad que permite trabajar con etiquetas lingüísticas y valores numéricos.

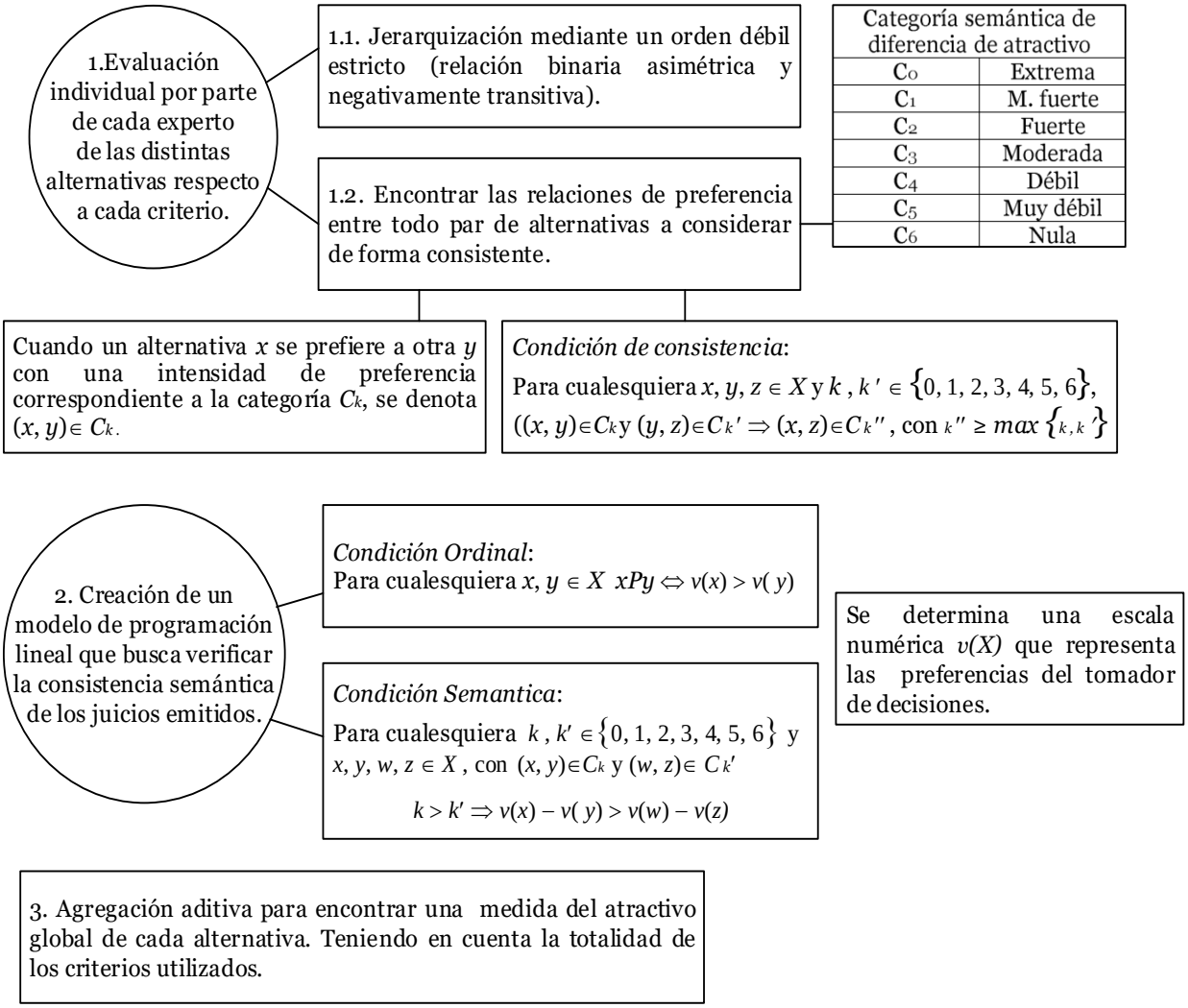


Figura 25. Método MACBETH. Fuente autores.

El objetivo de MACBETH es medir el atractivo de un conjunto de alternativas a través de una técnica de evaluación basada en categorías. Usa juicios cualitativos de las diferencias en el atractivo para generar puntajes de valor para las alternativas.

La comparación de cada par de alternativas está basada en 7 posibles respuestas verbales, está permitido el desacuerdo o vacilación crítica entre dos o más categorías consecutivas, exceptuando la indiferencia (Bana, Corte, & Vansnick, 2003; J. L. García & Meneses, 2000).

MACBETH deriva puntajes para las alternativas del conjunto consistente de juicios, estos puntajes constituyen la escala numérica básica de MACBETH, que el juez debe validar posteriormente. Para validar la escala, se deben comparar los tamaños de los intervalos entre los puntajes propuestos y ajustarlos si es necesario, uno a la vez dentro de un rango compatible con los juicios obtenidos (Bana e Costa, De Corte, & Vansnick, 2004).

Si se necesita un ajuste adicional, se pueden revisar los juicios proporcionados previamente**.** Los pesos de los criterios también pueden derivarse aplicando el procedimiento MACBETH a un conjunto de alternativas hipotéticas de referencia (Bana e Costa, De Corte, & Vansnick, 2011; Bana e Costa & Vansnick, 1995).

Carlos A. Bana e Costa, Jean-Marie De Corte y Jean-Claude Vansnick crearon el software M-MACBETH, para facilitar la aplicación del método. Este software proporciona una útil herramienta de búsqueda de inconsistencias a medida que se introducen los datos, tanto en las comparaciones cualitativas, cuantitativas como por pares (Gironés et al., 2008).

M-MACBETH cuenta con un sistema potente de análisis, que permite configurar el porcentaje de incertidumbre de cada criterio, para confirmar si las dominancias de una a otra alternativa son robustas o no, permite realizar numerosos análisis de sensibilidad sobre la escala de atractivo global y cada cambio de un valor se refleja instantáneamente en todos los demás valores de los que depende (Bana et al., 2003).

2.3.2.9 Método ELECTRE I (ELimination Et Choix Traduisant la REalité)

El método ELECTRE fue propuesto por Bernard Roy en 1965. ELECTRE pertenece al conjunto de métodos multiatributo que manejan información cardinal, se basa en la comparación de la superioridad binaria entre alternativas. Proporciona a los responsables de la toma de decisiones la capacidad de incorporar una gran cantidad de criterios cualitativos y cuantitativos en el proceso de toma de decisiones (Dias & Mousseau, 2016).

Se ha desarrollado una familia de métodos ELECTRE con el propósito ampliar su aplicabilidad a los diferentes tipos de problemas que se pueden llegar a presentar en la toma de decisiones:

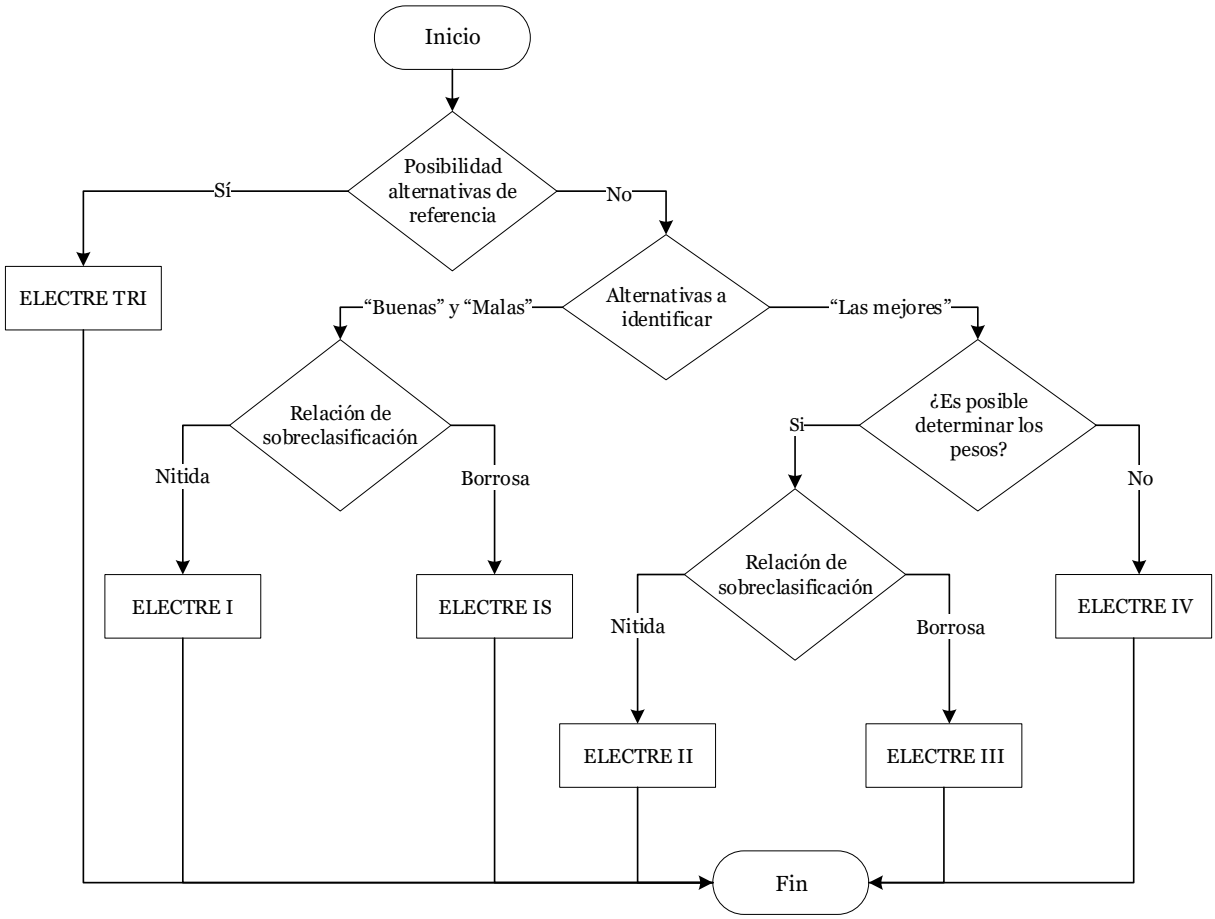


Figura 26. Clasificación métodos ELECTRE. Tomado de (Maystre et al., 1994).

En ELECTRE I la sobreclasificación entre dos alternativas se establece mediante los umbrales de concordancia y discordancia, el primero cuantifica hasta qué punto para un elevado número de atributos una alternativa es preferida a otra y el segundo mide hasta qué punto no existe ningún atributo para el que una alternativa es mucho mejor que otra. La finalidad del método consiste en encontrar el kernel: alternativa o conjunto de alternativas mejor clasificadas e indiferentes entre sí.

Los métodos ELECTRE son relevantes cuando se enfrentan situaciones de decisión con las siguientes características (Figueira, Mousseau, & Roy, 2005):

1. El responsable de la toma de decisiones desea incluir en el modelo al menos tres criterios; sin embargo, los procedimientos de agregación son más adecuados en situaciones en las que los modelos de decisión incluyen más de cinco criterios (hasta doce o trece). Y al menos una de las siguientes situaciones debe ser verificada:

2. Las acciones se evalúan (para al menos un criterio) en una escala cardinal o una escala débil de intervalo. estas escalas no son adecuadas para la comparación de diferencias, por lo tanto, es difícil y / o artificial definir una codificación que tenga sentido en términos de preferencia de las proporciones.

3. Existe una fuerte heterogeneidad con la naturaleza de la evaluación entre los criterios. Esto hace que sea difícil agregar todos los criterios en una escala única y común.

4. La compensación de la pérdida en un criterio dado por una ganancia en otra puede no ser aceptable para el DM. Por lo tanto, tales situaciones requieren el uso de procedimientos de agregación no compensatorios.

5. Para al menos un criterio, lo siguiente es cierto: pequeñas diferencias de evaluación no son significativas en términos de preferencias, mientras que la acumulación de varias pequeñas diferencias puede volverse significativa. esto requiere la introducción de umbrales de discriminación (indiferencia y preferencia) que conducen a una estructura de preferencias con una relación binaria de indiferencia intransitiva integral.

$$
\begin{array}{c|cccccc}
 & F_j & Min & Max & \dots & \dots & \dots \\
 & C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_n \\
 & w_1 & w_2 & \dots & w_j & \dots & w_n \\
\hline
A_1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1n} \\
A_2 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2n} \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
A_i & x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
A_m & x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn}
\end{array}
$$

1. Definir la Matriz de Decisión con los respectivos pesos de cada criterio.

2. Normalizar por el rango los valores de cada uno de los criterios.

Se debe tener en cuenta si las funciones de criterio desean ser maximizadas o minimizadas.

3. Calcular la matriz de decisión normalizada ponderada.

$$
\begin{array}{c|cccccc}
 & C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_n \\
\hline
A_1 & P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1j} & \dots & P_{1n} \\
A_2 & P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2j} & \dots & P_{2n} \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
A_i & P_{i1} & P_{i2} & \dots & P_{ij} & \dots & P_{in} \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
A_m & P_{m1} & P_{m2} & \dots & P_{mj} & \dots & P_{mn}
\end{array}
$$

$$P_{ij} = x_{ij} * w_j \ \forall \ i = 1, \dots, m$$

4. Crear matrices de concordancia y discordancia

$$\text{Índice de Concordancia } C_{ik} = \sum_{j;\, C_j(A_i) > C_j(A_k)} w_j + \frac{1}{2} \sum_{j;\, C_j(A_i) = C_j(A_k)} w_j \;;\; 0 \;\forall \text{ otra alternativa}$$

$$\text{Índice de Disconcordancia } D_{ik} = \frac{\max\limits_{j;\; C_j(A_i) < C_j(A_k)} \left| C_j(A_i) - C_j(A_k) \right|}{\max\limits_{j} \left| C_j(A_i) - C_j(A_k) \right|}$$

$$\begin{array}{c} \\ A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_m \end{array}
\begin{array}{c}
\begin{array}{cccccc} A_1 & A_2 & \dots & A_k & \dots & A_m \end{array} \\
\begin{bmatrix}
 & C_{12} & \dots & C_{1k} & \dots & C_{1m} \\
C_{21} & & \dots & C_{2k} & \dots & C_{2m} \\
\vdots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\
C_{i1} & C_{i2} & \dots & & \dots & C_{im} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\
C_{m1} & C_{m2} & \dots & C_{mk} & \dots &
\end{bmatrix}
\end{array}
\qquad
\begin{array}{c} \\ A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_m \end{array}
\begin{array}{c}
\begin{array}{cccccc} A_1 & A_2 & \dots & A_k & \dots & A_m \end{array} \\
\begin{bmatrix}
 & D_{12} & \dots & D_{1k} & \dots & D_{1m} \\
D_{21} & & \dots & D_{2k} & \dots & D_{2m} \\
\vdots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\
D_{i1} & D_{i2} & \dots & & \dots & D_{im} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\
D_{m1} & D_{m2} & \dots & D_{mk} & \dots &
\end{bmatrix}
\end{array}$$

4. Crear matrices de dominancia concordante y discordante

$$\text{Umbral de Concordancia } UC = 0.5$$

$$\text{Umbral de Disconcordancia } UD = \text{Promedio simple de los indices de discodancia}$$

$$DC_{ik} = \begin{matrix} 1 & \forall & C_{ik} > UC \\ 0 & \forall & C_{ik} < UC \end{matrix}$$

$$DD_{ik} = \begin{matrix} 1 & \forall & D_{ik} < UD \\ 0 & \forall & D_{ik} > UD \end{matrix}$$

$$
\begin{array}{c|cccccc}
 & A_1 & A_2 & \dots & A_k & \dots & A_m \\
\hline
A_1 & & DC_{12} & \dots & DC_{1k} & \dots & DC_{1m} \\
A_2 & DC_{21} & & \dots & DC_{2k} & \dots & DC_{2m} \\
\vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\
A_i & DC_{i1} & DC_{i2} & \dots & & \dots & DC_{im} \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\
A_m & DC_{m1} & DC_{m2} & \dots & DC_{mk} & \dots &
\end{array}
\qquad
\begin{array}{c|cccccc}
 & A_1 & A_2 & \dots & A_k & \dots & A_m \\
\hline
A_1 & & DD_{12} & \dots & DD_{1k} & \dots & DD_{1m} \\
A_2 & DD_{21} & & \dots & DD_{2k} & \dots & DD_{2m} \\
\vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\
A_i & DD_{i1} & DD_{i2} & \dots & & \dots & DD_{im} \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\
A_m & DD_{m1} & DD_{m2} & \dots & DD_{mk} & \dots &
\end{array}
$$

4. Crear matriz de dominancia agegada

$$\text{Índice de Dominancia Agregada } DA_{ik} = DC_{ik} * DD_{ik}$$

$$
\begin{array}{c|cccccc|c}
 & A_1 & A_2 & \dots & A_k & \dots & A_m & \\
\hline
A_1 & & DD_{12} & \dots & DD_{1k} & \dots & DD_{1m} & S_1 \\
A_2 & DD_{21} & & \dots & DD_{2k} & \dots & DD_{2m} & S_2 \\
\vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\
A_i & DD_{i1} & DD_{i2} & \dots & & \dots & DD_{im} & S_i \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & \vdots \\
A_m & DD_{m1} & DD_{m2} & \dots & DD_{mk} & \dots & & S_m \\
\hline
 & V_1 & V_2 & \dots & V_k & \dots & V_m &
\end{array}
$$

Suma vector fila

Suma vector Columna

S_i: Indica el número de alternativas que sobre clasifica la alternativa i
V_k: Indica el numero de alternativas que sobre clasifican a la alternativa k

Figura 27. Método ELECTRE I. Fuente autores.

2.4 Propiedades de los MCDM.

Tabla 5. Propiedades de los MCDM, tomado de (Guarini, 2018).

Variables Exógenas	**Calificación de variables**	**Propiedades de la herramienta MCDA en el sistema binario**						
		ELECTRE	**MAUT**	**ANP**	**MACBETH**	**AHP**	**TOPSIS**	**PROMETHEE**
Cantidad de elementos de evaluación	Número limitado de criterios y subcriterios y un pequeño número de alternativas	1	0	0	0	0	0	0
	Número limitado de criterios y subcriterios y un gran número de alternativas	0	1	0	0	0	0	0
	Gran cantidad de criterios y subcriterios y un pequeño número de alternativas	0	0	1	0	1	0	0
	Gran cantidad de criterios y subcriterios y un gran número de alternativas	0	0	0	1	0	1	1
Tipología de indicadores	Cuantitativo	1	1	1	1	1	1	1
	Cualitativo	1	0	1	1	1	1	1
	Mixto	1	0	1	1	1	1	1
Los interesados se incluirán en el proceso de decisión	Proceso participativo no activado	1	1	1	1	1	1	1
	Proceso participativo activado con un número limitado y especializado de partes interesadas	1	1	1	1	1	1	1
	Proceso participativo activado con un número significativo de partes interesadas preferiblemente organizadas en categorías	1	1	1	1	1	1	1
Solución esperada	Una mejor definición de la alternativa general para el propósito	1	0	0	0	0	0	0
	Definición de la alternativa ideal más cercana al objetivo	0	0	0	0	0	1	0
	Una mejor definición de la alternativa general para el propósito	0	1	1	1	1		1
	Definición de la alternativa ideal más cercana al objetivo	0	0	0	0	0	1	0
Asistencia técnica de un especialista en ayuda para la adopción de decisiones	Sí (aconsejable)	1	1	1	1	0	0	0
	No (no es necesario)	0	0	0	0	1	1	1

Tabla 5. Continuación.

Variables Endógenas	Calificación de variables	Propiedades de la herramienta MCDA en el sistema binario						
		ELECTRE	MAUT	ANP	MACBETH	AHP	TOPSIS	PROMETHEE
Tipo de problemas para la toma de decisiones	Clasificación	1	0	0	0	0	0	0
	Descripción	1	0	0	0	0	0	0
	Clasificación / Elección	1	1	1	1	1	1	1
Enfoque de la solución	Enfoque extraoficial	1	0	0	0	0	0	1
	Enfoque total de agregación	0	1	1	1	1	0	0
	Objetivo, aspiración o enfoque de nivel de referencia	0	0	0	0	0	1	0
Procedimiento de implementación	Umbrales de preferencia, umbrales de indiferencia, umbrales de veto	1	0	0	0	0	0	0
	Umbrales de preferencia, umbrales de indiferencia	0	0	0	0	0	0	1
	Función de utilidad	0	1	0	0	0	0	0
	Comparación por pares en escala racional e interdependencias	0	0	1	0	0	0	0
	Comparación por pares en la escala de intervalos	0	0	0	1	0	0	0
	Comparación por pares en escala racional	0	0	0	0	1	0	0
	Opción ideal y opción anti-ideal	0	0	0	0		1	0
Nivel de entrada	Alto		1	1	1	1	0	
	Medio	1	0	0	0	0		1
	Bajo	0	0	0	0	0	1	0
Tipología de salida	Orden parcial obtenido expresando grados de preferencia por pares	1	0	0	0	0	0	1
	Ordenamiento total obtenido expresando grados de preferencia por pares	1	0	0	0	0	0	1
	Pedido completo obtenido al considerar los puntajes	0	1	1	1	1	0	0
	Orden completo con puntaje más cercano al objetivo asumido	0	0	0	0	0	1	0
Solución de problema de decisión	n categorías de alternativas de puntaje igual pero diferente comportamiento	1	0	0	0	0	0	1
	Alternativa con el puntaje global más alto	0	1	1	1	1	0	0
	Alternativa con el puntaje más cercano a la solución ideal	0	0	0	0	0	1	0

2.5 Diagramas de Ishikawa

Los diagramas de Ishikawa también conocidos como diagramas causa-efecto o espina de pescado son una de las siete herramientas básicas de la calidad recopiladas y divulgadas por Kaoru Ishikawa. En el libro Guide to quality control de 1976, se presentan los fundamentos básicos de esta herramienta.

La estructura básica de un diagrama de Ishikawa está conformada por un efecto o característica que se busca controlar o mejorar y un conjunto de causas o factores que ocasionan dicho efecto. Cada causa genera una rama dentro del diagrama, que podrá contener sub causas o factores aún más detallados.

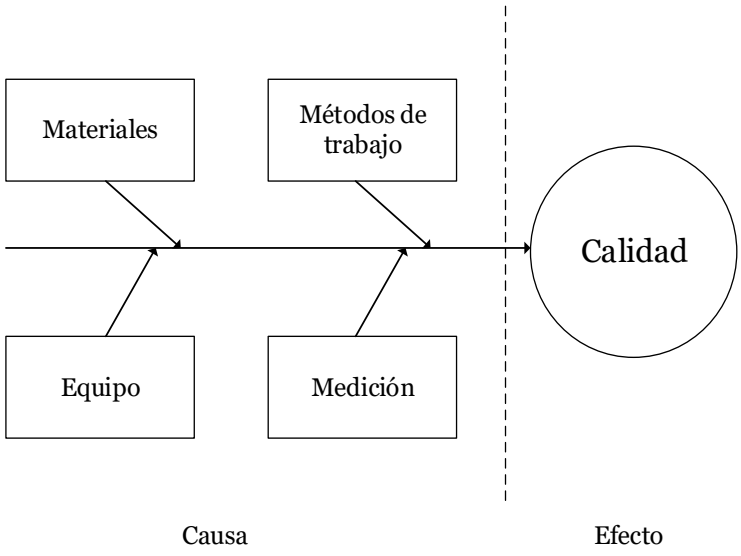


Figura 28. Diagrama de Ishikawa. Tomado de (Ishikava, 1976).

Un diagrama de causa y efecto puede ser una guía para llevar a cabo discusiones. Una discusión no es útil cuando los oradores se desvían de su tema. El diagrama de causa y efecto sirve como foco para la discusión, generando una integración de todos los involucrados.

Dado que este tipo de diagrama ilustra la relación entre la causa y el efecto de una manera racional, puede usarse en cualquier situación problémica. Conocida la relación entre la causa y el efecto de un problema, es posible definir de forma rápida los posibles cursos de acción para tomar medidas contra la causa y de esta forma resolver el problema.

CAPÍTULO 3

Desarrollo del proyecto

En este capítulo se presenta el desarrollo de cada uno de los objetivos planteados para el proyecto:

El estado del arte permite identificar los límites de la frontera del conocimiento existentes en referencia a la problemática analizada.

La caracterización de los métodos multicriterio relaciona la aplicabilidad de los métodos seleccionados a las situaciones particulares que puede enfrentar un tomador de decisiones cuando valora diagramas de Ishikawa.

El modelo planteado hace uso de estas relaciones para definir una metodología que guía al tomador de decisiones durante todo el proceso decisional.

Finalmente se ejemplifica el modelo con el propósito de ilustrar el uso de la metodología propuesta.

3.1 Estado del Arte.

Para la elaboración del estado del arte se consultaron las bases de datos ScienceDirect, ResearchGate y Springer, utilizando las siguientes de palabras claves: Diagrama de Ishikawa, Diagrama causa-efecto, Diagrama de Ishikawa Ponderado, Valoración de Diagramas de Ishikawa, Análisis comparativo métodos Multicriterio Discretos. Se seleccionaron aquellas publicaciones relacionadas con aplicaciones teóricas y/o prácticas del uso y la valoración de los Diagramas de Ishikawa. Se tuvo en cuenta publicaciones de máximo 15 años de antigüedad, sin embargo, se dio prioridad a las publicaciones más recientes.

Diagrama de Ishikawa como herramienta de representación gráfica:

La aplicación básica de los diagramas de Ishikawa es facilitar el análisis de problemas mediante una representación gráfica de relaciones de causalidad:

(Genaro, Ortega, & Pappa, 2011)utilizó un diagrama de Ishikawa que identificó las causas raíces de un indicador para la gestión empresarial y facilitó la formalización de un plan de acción generado por el ciclo PDCA para su ejecución y control.

En otra Aplicación práctica (Domingos, Carvalho, Zilli, & Monteiro, 2015), utiliza los diagramas de Ishikawa para determinar las causas y plantear las posibles soluciones a los problemas identificados en las actividades logísticas de una empresa.

En (Coccia, 2017) el diagrama de Ishikawa se utiliza como una representación visual del marco teórico integral para explicar la fuente y la evolución de las tecnologías de propósito general a lo largo del tiempo.

Integración de Diagramas de Ishikawa con Métodos Multicriterio:

(Monteiro & Gomes, 2009) utilizaron MASP (Método de Análisis y Solución de Problemas mediante la estructuración de los pasos a seguir para abordar una no conformidad a partir del ciclo PDCA), para disminuir el tiempo de resolución de un problema, proponiendo un medio alternativo de probar las hipótesis más probables identificadas con el diagrama de Ishikawa, utilizando AHP y la opinión de especialistas en el proceso, para verificar la

acción que ocasiona un mayor impacto en la solución de los problemas. Para la determinación de las causas más probables se consideraron el Método de los "porqués", la Prueba de las causas y la Matriz de priorización de problemas GUT.

El estudio (Malinowska, 2010) aplica el concepto del diagrama de Ishikawa ponderado para la identificación de los factores que tienen un impacto considerable en las cargas ambientales que surgen y que contribuyen a la profundización del grado de contaminación ambiental. La metodología abarca la definición del conjunto de causas principales y grupos de sub causas para cada causa principal, la fijación de sus ponderaciones al usar el método de comparación por pares (Las evaluaciones dependen de las diferencias en el uso o la presencia de cada par de factores comparado) y el cálculo de los valores absolutos de las ponderaciones. El objetivo es identificar aquellos factores cuya participación en la creación del resultado examinado es mayor.

(Monteiro & Gomes, 2011) investigaron la jerarquización de los problemas en diagramas de Ishikawa, desarrollando una técnica basada en el Método AHP que indica la causa más probable de la falla. Mediante el análisis de los diagramas, se definen las hipótesis y acciones más probables, se construye una estructura jerárquica del AHP, elaborada a partir de la jerarquía del diagrama de Ishikawa, teniendo como alternativas las acciones correctivas, y como objetivo global la corrección del problema. Las causas son utilizadas como criterios de decisión.

(Yazdani & Tavakkoli-Moghaddam, 2012) presentan el estudio de un caso realizado en una línea de producción de jabón, donde se buscaba resolver un problema con el manejo de los desechos. Integraron la técnica de la lluvia de ideas, el uso del diagrama de causa y efecto y el proceso de jerarquía analítica, para identificar los factores relevantes, las relaciones de causalidad y finalmente determinar la prioridad para cada una de las posibles soluciones, con el fin de lograr una decisión eficiente.

(Gomes, Crespo, Carvalho, Monteiro, & Gomes, 2013) Investigan la eficiencia del proceso de producción de una empresa de hormigón a través de las herramientas del Control Estadístico de la Calidad (CEQ). En caso de no conformidad, se utiliza un tratamiento multicriterio para señalar la causa raíz.

(Aydin, Shaygan, & Dasdemir, 2014). Propusieron utilizar una metodología basada en el diagrama de causa y efecto integrado con el método de Jerarquía Analítica (AHP) para seleccionar proyectos basados en el conocimiento de expertos. Se incluye la implementación de la metodología al sistema de citas hospitalarias. Los posibles proyectos, son tomados como ramas en el diagrama de Ishikawa, y se determina una ponderación en función de su importancia utilizando AHP. La causa con el mayor peso se declara como el proyecto más eficiente para mejorar la calidad con respecto a los diferentes criterios.

En (Sun, Xiang, Jiang, & Che, 2015) el diagrama de Ishikawa se utiliza como una herramienta grafica que presenta los factores de riesgo de la cadena de suministro, identificados mediante el análisis de su mecanismo operativo, características esenciales y resultados de investigaciones previas. Estos factores de riesgo son utilizados como criterios para comparar alternativas a través del método TOPSIS Difuso.

(Shaygan, 2016) propuso un marco de decisión integrado basado en el Diagrama de Ishikawa y la metodología del Proceso Jerárquico Analítico difuso (FAHP). El diagrama de Ishikawa se utiliza para identificar las causas y subcausas de un problema, y el método FAHP se utiliza para priorizar las alternativas. Se realizó una comparación pareada de las alternativas principales, y cada conjunto de subcausas secundarias en función de la importancia relativa frente al impacto en el desempeño del efecto problema considerado.

(Aguirre, Vela, Idalia Sánchez, & Delgado, 2017) propusieron una metodología que permite crear una jerarquización de las causas identificadas en diagramas de Ishikawa mediante la aplicación del método DEMATEL, con el fin de facilitar la toma de decisiones. Se da solución al algoritmo mediante un programa creado en Matlab, evaluando su funcionamiento mediante el estudio de un caso presentado en una fábrica de transformadores.

Integración de Diagramas de Ishikawa y otros métodos:

(Ciocoiu, Ilie, & Ciocoiu, 2010) propusieron ampliar la aplicabilidad del Diagrama de Ishikawa al incluir en el análisis las probabilidades y el impacto que permiten determinar el puntaje de riesgo para cada categoría de causas y riesgo global. Incluyeron una aplicación práctica.

En (Monat, 2012) se propuso al Diagrama de Ishikawa y a la Matriz de Evaluación de Riesgo Mejorada (ERAM) como herramientas suficientes para la gestión de los riesgos de un proyecto. Con el diagrama de Ishikawa se identifican los riesgos, mientras que el ERAM ayuda a evaluar, cuantificar, evaluar, priorizar y abordar los riesgos.

(Ahmad & Hasan, 2016) desarrolla una investigación detallada sobre la reducción de re procesos, en una fábrica de alimentos mediante la aplicación del Análisis de Pareto y el uso de un diagrama de Ishikawa.

En (Hossen, Ahmad, & Ali, 2017) se llevó a cabo una aplicación similar para examinar las pérdidas por detención en una fábrica textil.

(Da silva, Pererira, Cunto, & Figueiredo, 2016) hacen uso de la herramienta FMEA y los Diagramas de Ishikawa en un negocio textil.

En (Górny, 2018) el diagrama de Ishikawa se utilizó como una herramienta para la identificación de las causas de los problemas. El método de Pareto se usó como complemento para organizarlas por prioridad sobre la base del impacto vinculado a una causa específica. Estos principios se utilizaron en una aplicación práctica que identificó y priorizó las causas de accidentes ocupacionales.

Los autores (Hoła, Nowobilski, Szer, & Szer, 2017) utilizaron el diagrama de Ishikawa para presentar gráficamente las relaciones mutuas entre factores que influencian a la tasa de accidentalidad en la industria de la construcción y el coeficiente de correlación para determinar el grado de dependencia entre cada uno de estos factores y el efecto.

(Lira, Hirai, Oliveira, Portellinha, & Nakano, 2017) Identificaron las causas de un brote de queratitis difusa laminar (DLK) mediante el uso de un Diagrama de Ishikawa para determinar los posibles factores de riesgo involucrados. Verificaron la coherencia entre

las ocurrencias y cada posible causa enumerada en el diagrama por medio de un análisis multivariado realizado a través de regresión logística binaria.

Análisis comparativo de los Métodos MCDM:

Dado el elevado número de métodos multicriterio desarrollados, sus extensiones y el número creciente de métodos híbridos propuestos (Zavadskas, Govindan, Antucheviciene, & Turskis, 2016), la elección del método a utilizar para la toma de una decisión es un problema de decisión en sí mismo. En la literatura se pueden encontrar numerosas comparaciones tanto prácticas (Ceballos, Lamata, & Pelta, 2016) como teóricas para ciertos conjuntos de métodos multicriterio.

(Munda, 2004) concluye que no es posible establecer a priori qué método resulta mejor para un problema empírico dado, sino que las condiciones en las que estos métodos se aplican mejor dependen del contexto. Por lo tanto, el problema radica en elegir el método correcto para determinado problema. Esto hace que el enfoque sea más flexible pero también más confuso.

(T. Saaty & Daji, 2014) realizaron una revisión literaria detallada de estudios centrados en la evaluación y comparación de diferentes métodos multicriterio que tenían como objetivo analizar sus similitudes y diferencias o proponer un procedimiento para guiar a los usuarios a seleccionar un método apropiado y explorar si existen razones matemáticas, sociales o prácticas por las que un método es mejor que otro. Saaty propuso un enfoque general diseñado para la evaluación de métodos MCDM por medio de 16 criterios de decisión.

(Guarini, 2018) formularon una taxonomía de las variables endógenas y exógenas de los métodos de análisis multicriterio y delinearon un procedimiento para seleccionar el método más adecuado para las consultas específicas de evaluación, que comúnmente surgen al abordar los problemas de toma de decisiones. En particular, cuestiones de gestión de tierras y bienes inmuebles.

Tabla 6. Criterios de decisión para la evaluación de métodos MCDM, basado en (T. Saaty & Daji, 2014).

	Calificación del método evaluado			
CRITERIO	**NA**	**Bajo**	**Medio**	**Alto**
Simplicidad de ejecución.		La lógica del modelo es complicada y solo puede ser utilizada por los responsables de la toma de decisiones o expertos profesionales.	Se necesita un esfuerzo considerable para aprenderlo.	Puede ser fácilmente entendido e implementado por la mayoría de los usuarios en la práctica.
Estructura completa: amplitud y profundidad.		Contiene solo unos pocos criterios sin descomposición a subcriterios, sub-sub criterios con los detalles necesarios.	Su estructura no es ni ancha ni profunda.	Su estructura no solo es amplia (contiene un número de criterios distintos) sino también profunda (los criterios se pueden desglosar por subcriterios.
Estructura integral que consiste en subestructuras de mérito.	No involucra el análisis BOCR.	Considera uno o dos de los BOCR.	Implica tres partes de BOCR.	Considera todos los méritos de BOCR.
Procedimiento lógico y matemático.		Incluye solo un procedimiento lógico matemático simple.	Utiliza secuencia de referencias o diferencia relativa a alternativas de rango.	Usa una técnica de comparación por pares para determinar el predominio de un criterio sobre otro.
Justificación del enfoque: axiomas justificables.		Involucra matemáticas con axiomas para justificar su uso.	Implica axiomas de forma parcial.	Implica axiomas completos y lógicos.
Escalas de medición.		Usa la escala nominal u ordinal.	Usa escalas de intervalo o escalas de razón.	Usa escalas absolutas.
Síntesis de juicios con funciones de fusión.		Califica a las alternativas promediando ponderaciones.	Utiliza un método ponderado simple.	Usa una función de fusión rigurosa con pesos razonables.
Ranking de tangibles.	No implica algún tipo de clasificación de las alternativas	Usa una escala nominal.	Usa una escala ordinal.	Escala cardinal para clasificar alternativas.
Generalización al Ranking de intangibles.		Cuantifica intangibles asignando números ordinales arbitrarios.	Transforma intangibles en números cardinales usando una escala de intervalos o una escala de razones o una escala absoluta.	Evalúa intangibles mediante el uso de la técnica de comparación por pares para considerar su importancia relativa, ya sea con respecto a un ideal retenido en la memoria o relativamente y de acuerdo con los deseos del usuario.

Tabla 6. Continuación.

Rango de preservación y reversión.		Asume la conservación de rango.	Trata tanto con la preservación de rango como con la reversión de rango.	Es capaz de interpretar las razones de la preservación de rango y la reversión de rango e implementa la idea en sus procedimientos.
Análisis de sensibilidad.		Involucra solo un parámetro.	Funciona en dos o tres parámetros.	Es capaz de evaluar más de tres parámetros.
Validación de problemas de decisión.		No implica validación justificable de algún tipo.	Solo utiliza ejemplos con elementos tangibles para validar sus procedimientos.	Usa ejemplos del mundo real con intangibles para validar su efectividad.
Predicción del resultado de decisiones con intangibles (La capacidad de predecir preferencias).		Solo juega con números al pretender que lo que hace es correcto y puede darse por hecho.	Hace un trabajo creíble sin la necesidad de mucha explicación o argumento.	Implica directamente la predicción de una decisión (los resultados previstos coinciden con el resultado de esa decisión).
Generalizabilidad a la dependencia y la retroalimentación.	No implica retroalimentación en el proceso de tomar una decisión	La dependencia o retroalimentación se usa indirectamente.	Ambos influyen parcialmente en los resultados de la toma de decisiones.	Se consideran como parte de las aportaciones de la decisión misma que pueden afectar los resultados de esa decisión.
Aplicabilidad a la resolución de conflictos.		Utiliza una técnica de compensación matemática simple para hacer concesiones en un conflicto.	Usa un método analítico para tratar la resolución de conflictos.	Puede proporcionar la mejor solución para un conflicto de grupo que sea comprensible, aceptable, práctica y flexible.
Confiabilidad y validez del enfoque.		Utiliza un modelo de medición ordinal con una estructura simple.	Utiliza un modelo de medición cardinal pero no proporciona axiomas matemáticos rigurosos.	Usa un modelo de medida cardinal con procedimiento matemático lógico y axiomas matemáticos.

Conclusiones en virtud al estado del arte

Se observa que los diagramas de Ishikawa continúan siendo utilizados de forma tradicional como herramienta grafica de diagnóstico, junto a diferentes técnicas que permiten volver más aplicativa la herramienta.

En la toma de decisiones los diagramas de Ishikawa permiten visualizar de manera sencilla las relaciones de causalidad de un problema, permitiendo que técnicas como el análisis de Pareto realicen una priorización de las causas identificadas.

Las publicaciones seleccionadas demuestran la viabilidad del uso del diagrama de Ishikawa como herramienta para la representación gráfica de un problema y su integración con los métodos multicriterio para su valoración.

La aplicación de los métodos multicriterio en la toma de decisiones representables en diagramas de Ishikawa se encuentra limitada, si se tiene en cuenta la amplia gama de métodos multicriterio existentes. En la mayoría de estas aplicaciones el enfoque utilizado para la valoración de los diagramas consiste en hacer uso de un único criterio que mide el impacto de cada una de las alternativas de solución respecto a cada una de las causas y sub causas consideradas.

3.2 Caracterización de los métodos de valoración.

Los métodos seleccionados fueron elegidos con el propósito de integrar a la valoración de diagramas de Ishikawa, métodos representativos de los diferentes enfoques y escuelas de la decisión multicriterio observados en la literatura.

Tabla 7. Caracterización de los métodos seleccionados para la ponderación de criterios, enfocada a la toma de decisiones representables en diagramas de Ishikawa. Fuente autores.

Característica \ Método		AHP	Ordenación Simple	Entropía	CRITIC
Tipo de Valoración	Dinámica y objetiva de la preferencia en relación con el proceso de toma de decisiones.			**X**	**X**
	Estática e independiente del proceso de toma de decisiones.	**X**	**X**		

Los métodos CRITIC y Entropía no requieren de la emisión de juicios por parte de los tomadores de decisiones. Las evaluaciones de la matriz de decisión deben estar en una escala ordinal, de intervalo y/o de razón.

Debido a que el método de entropía utiliza el logaritmo de las evaluaciones de las alternativas respecto a cada criterio, este no puede ser aplicado cuando alguna de ellas sea menor o igual a 0.

No se encontró una forma exacta de determinar el número adecuado de jueces para cada situación problémica específica. (T. L. Saaty & Özdemir, 2014) plantearon consideraciones generales para abordar este aspecto. Puede buscarse el consenso de grupo para la creación de la matriz de decisión y la determinación de pesos de criterios, o pueden agregarse los juicios individuales o las preferencias individuales emitidas por un grupo de jueces utilizando AHP o Programación por metas extendida. También podría desearse que cada juez realice su propia valoración utilizando uno de los métodos disponibles, para contrastarla con las valoraciones de los demás jueces.

Tabla 8. Caracterización de los métodos multicriterio discretos seleccionados para la valoración, enfocada a la toma de decisiones representables en diagramas de Ishikawa. Fuente autores.

Consideración \ Método		AHP	ANP	TOPSIS	VIKOR	PROMETHEE II	ELECTRE I	ZAPROS III	MACBETH	SMART
Uso de la matriz de decisión.	Información de entrada.			x	x	x	x			x
	Información de referencia.	x	x					x	x	
Limitación por elevado número de criterios. *								x		
Requiere definir parámetros específicos necesarios para la aplicación del método.					x	x	x			
Suposiciones de Linealidad.	El tomador de decisiones acepta la linealidad entre la utilidad del decisor y las funciones de los criterios elegidos para la valoración del diagrama.			x	x					x
	El tomador de decisiones rechaza la linealidad entre la utilidad del decisor y las funciones de los criterios elegidos para la valoración del diagrama.	x	x					x	x	
	El tomador de decisiones acepta la linealidad de las funciones de preferencia.					x	x			
	El tomador de decisiones rechaza la linealidad de las funciones de preferencia.					x*				
Requerimiento de software especializado. *									x	
El tomador de decisiones acepta la ponderación generada por el método.		x	x						x	x
El tomador de decisiones hará uso de un ranking completo e información adicional proporcionada por el método para ponderar el conjunto de alternativas valoradas.				x	x	x		x		
El tomador de decisiones acepta un kernel (Solución compromiso, conjunto compromiso) como el conjunto de alternativas que seleccionará para alcanzar el objetivo de la decisión.					x*	x	x			
El tomador de decisiones permitirá expresar algunas o todas las evaluaciones de la matriz de decisión como números intervalo y/o Números difusos. *				x	x	x	x			x*

El número de criterios determina el número de comparaciones que deben ser realizadas en el método ZAPROS III, estas comparaciones aumentan exponencialmente con cada criterio adicional, por lo que se recomienda su uso en problemas con pocos criterios (A juicio del tomador de decisiones).

El método PROMETHEE permite el uso de distintas funciones de preferencia, a través de los criterios generalizados, cinco de los criterios propuestos son lineales o lineales por partes y uno tiene forma gaussiana.

Software especializado: Software desarrollado específicamente para la aplicación de un método. Se hablaría de requerimiento de software especializado, cuando el tomador de decisiones tendría dificultades para utilizar el método si no cuenta con acceso a este. Se recomienda hacer uso este tipo de software, cuando el tomador de decisiones considera que el número de variables (alternativas, criterios) es elevado.

VIKOR y PROMETHEE, brindan al tomador de decisiones un ranking completo y sugieren una solución compromiso. El tomador de decisiones podría estar dispuesto a aceptar la solución compromiso como la(s) alternativa(s) seleccionadas para el logro del objetivo.

Para poder aplicar el método SMART cuando la matriz de decisión posee al mismo tiempo evaluaciones de tipo determinísticas, de intervalo y difusas, se deben expresar los números determinísticos y de intervalo como números trapezoidales difusos y realizar un proceso adicional de defuzzificación de la utilidad de cada alternativa, para que los resultados puedan ser comparados con los generados mediante otros métodos.

3.3 Modelo propuesto

MODELO MULTICRITERIO APLICADO A LA TOMA DE DECISIONES REPRESENTABLES EN DIAGRAMAS DE ISHIKAWA.

Consideración 1:

El efecto del diagrama de Ishikawa debe ser expresado como el objetivo general de la problemática a resolver.

Definición 1 – Causa o Sub causa exterior

Una causa o sub causa exterior es aquella que no tienen sub causas asociadas.

Consideración 2:

Las causas y sub causas deberán ser expresadas como objetivos específicos y posteriormente planteadas como alternativas de decisión cuando sea posible. En un principio solo las causas o sub causas exteriores del diagrama podrán estar expresadas como acciones concretas.

Consideración 3:

La estructura de un objetivo (General/Especifico) tendrá una de las siguientes formas:

- El verbo "Controlar", "Aumentar" o "Disminuir", seguido de la ocurrencia de un evento.
- El verbo "Mejorar" o "Controlar", seguido de la característica objeto de estudio.

Consideración 4:

Se debe identificar el conjunto de objetivos no factibles (relacionados con causas no controlables), estos objetivos se excluirán del problema de decisión. Se debe tener en cuenta que, aunque una sub causa expresada como un objetivo puede no ser factible, esta puede permitir el planteamiento de alternativas de solución individualmente factibles relacionadas con otro objetivo de decisión.

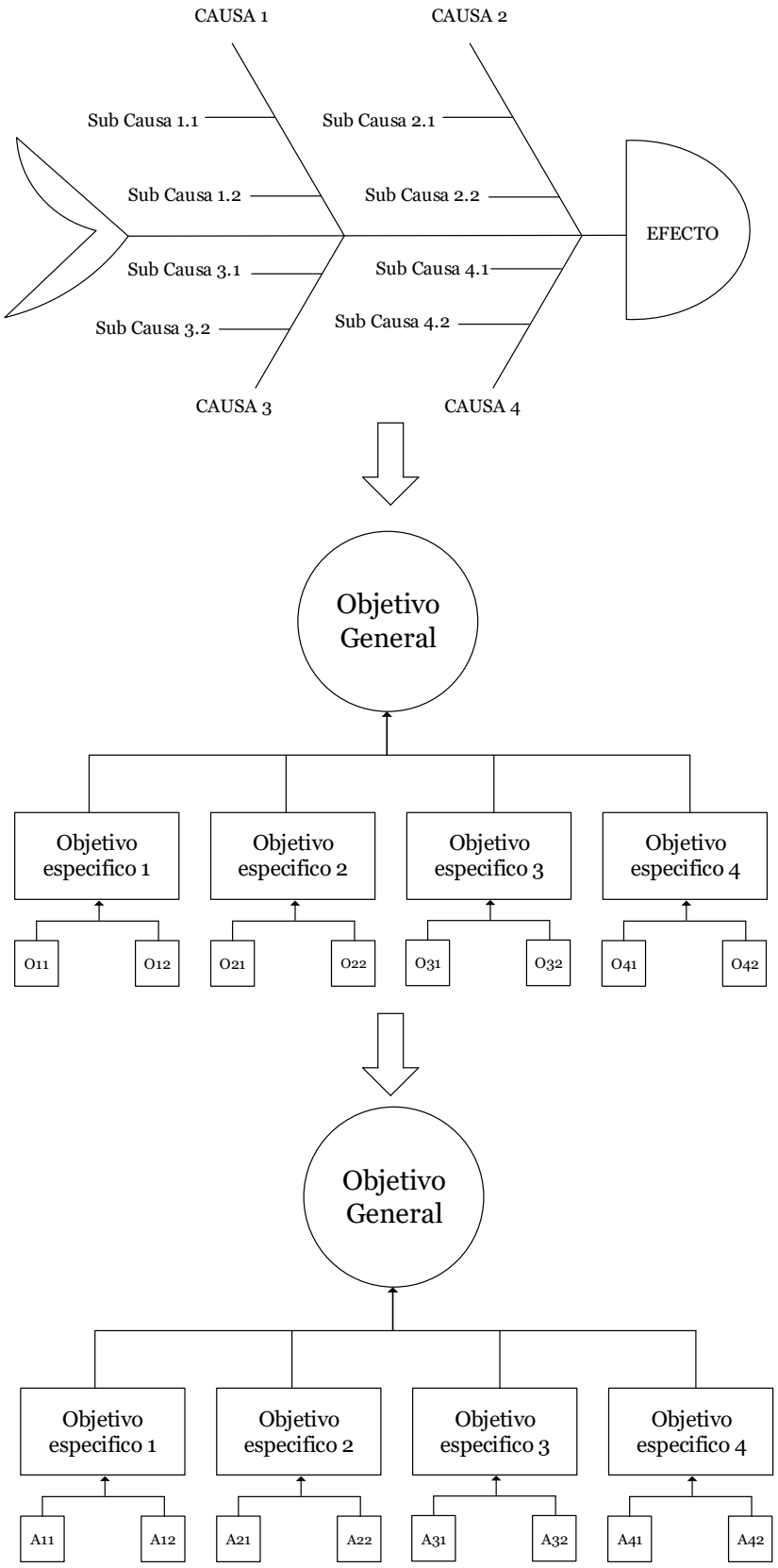


Figura 29. Consideración 1 y 2.

Definición 2 - Nivel de Decisión:

Un nivel de Decisión está conformado por un conjunto de alternativas con un objetivo común o punto referencia, donde la suma de las contribuciones de estas alternativas a la resolución del objetivo representa el 100% de lo alcanzable. Lo alcanzable engloba el conjunto máximo de acciones factibles identificadas.

Consideración 5:

Para cada nivel de decisión debe definirse como mínimo un criterio de decisión que mida el impacto de cada alternativa al logro del objetivo y un criterio que mida los recursos utilizados para ello.

Consideración 6:

Los niveles de decisión interiores están conformados por las causas o sub causas que tienen sub causas asociadas. Los niveles de decisión exteriores están conformados por las causas o sub causas exteriores.

Consideración 7:

Cada nivel de decisión debe ser valorado individualmente.

Consideración 8:

Dentro de un nivel, una causa Ck pude ser expresada como un conjunto de sub causas, tal que la suma de sus contribuciones al logro de la causa Ck, expresada como un objetivo sea del 100% de lo alcanzable.

Consideración 9:

Se supone la existencia de pares decisionales: los juicios emitidos por cada uno de los jueces tendrán la misma importancia.

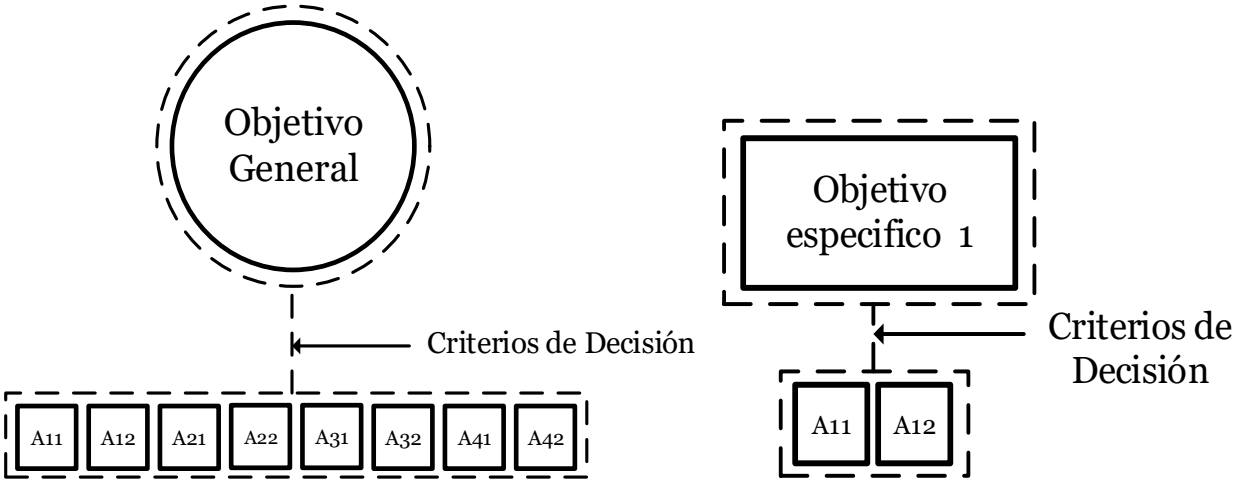


Figura 30. Niveles de decisión (Ejemplo 1 y 2).

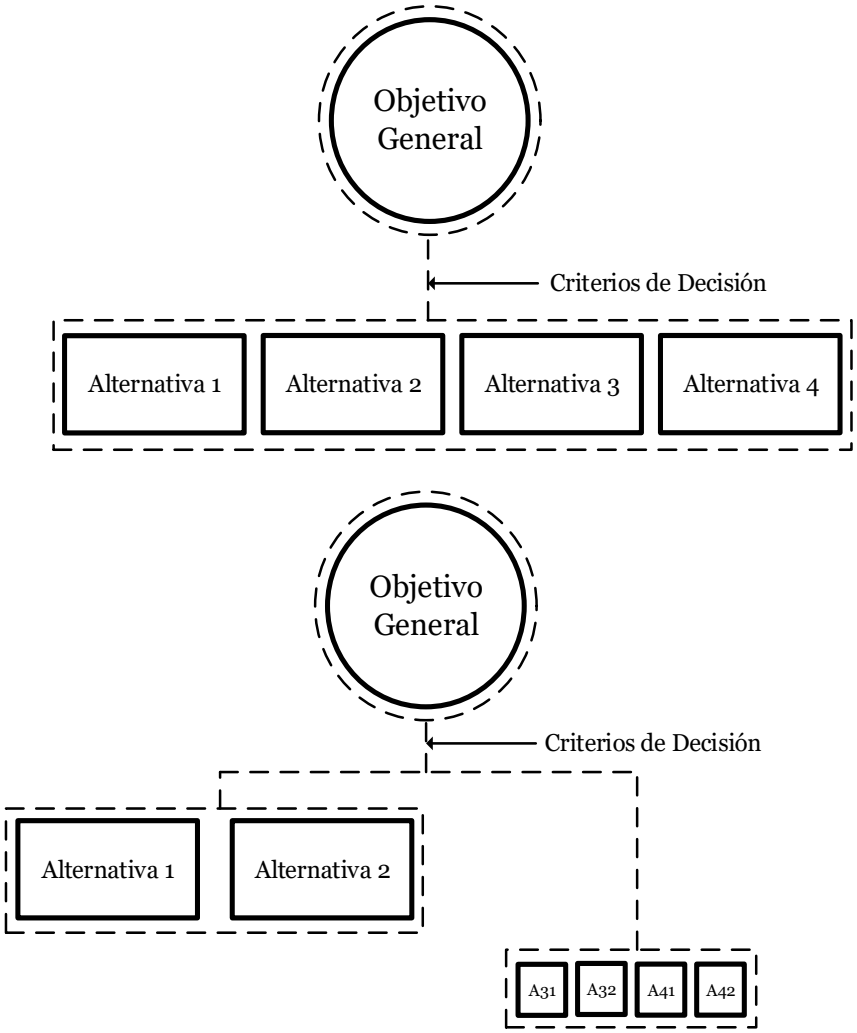


Figura 31. Niveles de decisión (Ejemplo 3 y 4).

¿Cómo valorar el diagrama?

El diagrama de Ishikawa puede valorarse de forma directa, ascendente o descendente:

La *valoración directa* se realiza tomando en cuenta únicamente el nivel compuesto por el objetivo general y cada una las alternativas propuestas a partir de las sub causas exteriores. Solo se consideran los criterios que compartan todas las alternativas. Por lo tanto, pueden verse excluidos criterios de interés.

Es conveniente utilizar la valoración directa solo si es posible determinar un conjunto de criterios que a juicio de los tomadores de decisiones sean suficientes para juzgar adecuadamente el conjunto global de alternativas.

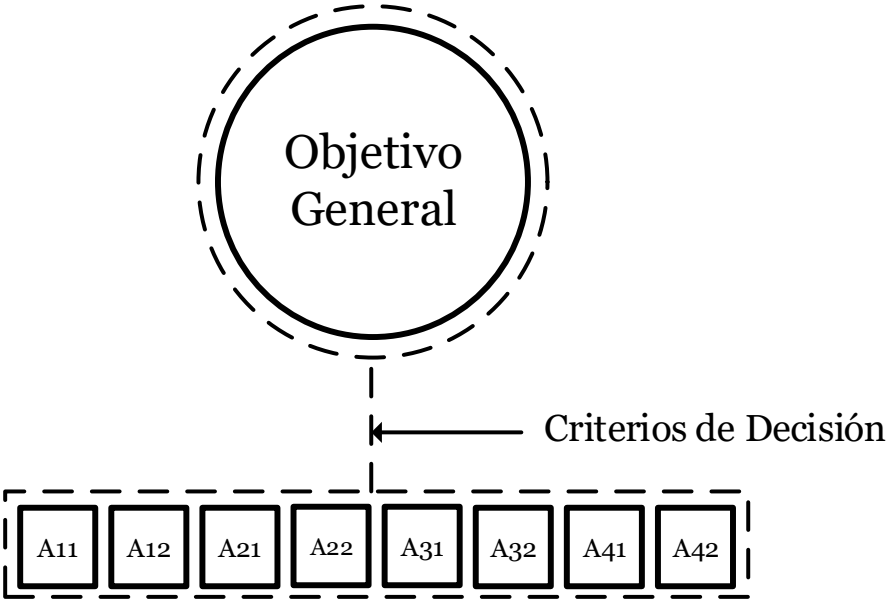


Figura 32. Valoración Directa.

La valoración ascendente puede llevarse a cabo de forma completa o parcial:

Valoración Ascendente Completa: se evalúan cada uno de los niveles de decisión de forma ascendente rama por rama, teniendo en cuenta todos los objetivos existentes en el diagrama. De esta forma sería posible aumentar el número de criterios en cada valoración, ya que las alternativas pertenecientes a una misma rama podrían poseer más características comparables.

Valoración Ascendente Parcial: se evalúan ciertos niveles de decisión del diagrama, prescindiendo de algunos de los objetivos. Se pueden omitir valoraciones, cuando el tomador de decisiones considera a priori que todas las alternativas que persiguen un mismo objetivo serán seleccionadas y comparadas individualmente frente a otras alternativas en un nivel de decisión superior. También es pertinente cuando es difícil expresar una causa o sub causa como un objetivo claro que permita definir criterios suficientes para la valoración.

Definición- Nivel superior:

Un nivel de decisión supera a otro, cuando la suma de las contribuciones de sus alternativas frente al logro del objetivo general está representada en una proporción por la suma de las contribuciones de las alternativas del otro.

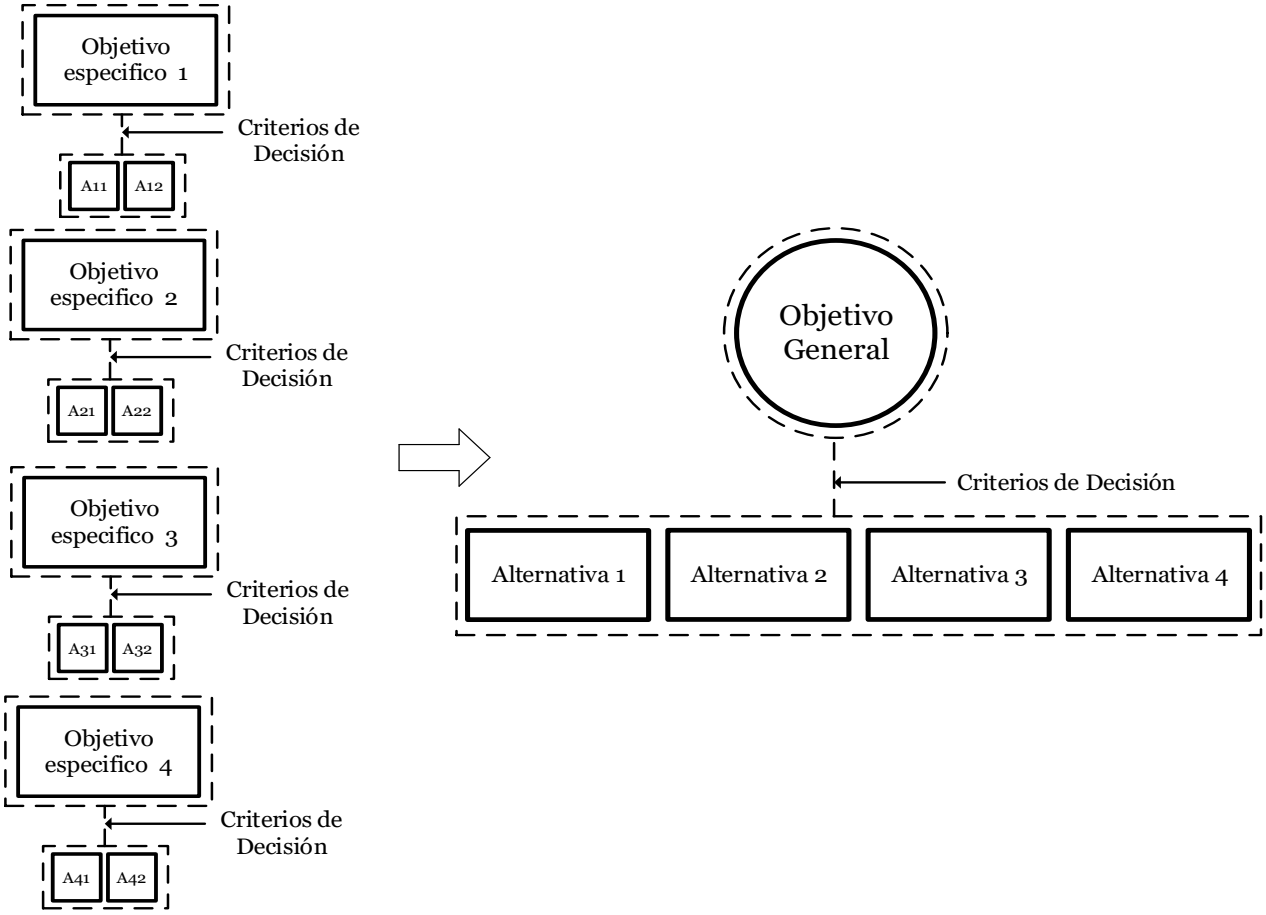


Figura 33.Valoración Ascendente.

La valoración descendente se realiza de forma completa, ya que no es posible valorar la totalidad del diagrama a partir de la valoración de las alternativas de un nivel interno.

La valoración ascendente podría conducir a mejores decisiones: La valoración de los niveles exteriores brindará al tomador de decisiones información relevante para la valoración de los niveles internos. Esta información no se tendría en cuenta en la valoración descendente, aumentando la subjetividad de las decisiones. Como consecuencia se descarta la valoración descendente del modelo.

Agrupación de alternativas.

Para cada nivel de decisión se deberá definir si existirá o no agrupación de alternativas, con base en el criterio de un grupo de expertos. Debe tenerse en cuenta un estudio de factibilidad de dichas agrupaciones.

La acción que define a una alternativa que representa a una causa cuando es comparada frente a otras, dependerá de las decisiones tomadas en los niveles de decisión inferiores. Esta acción puede contemplar una o varias sub causas.

La agrupación de alternativas puede realizarse antes o después de obtener las valoraciones de preferencia para un nivel de decisión. En el primer caso, solo se requiere de una valoración. En el segundo caso el tomador de decisiones conocerá a priori las valoraciones de preferencia individuales de cada alternativa. Sin embargo, deberá valorar nuevamente el nivel de decisión incluyendo las agrupaciones de alternativas seleccionadas.

Si se evaluaran todas las combinaciones posibles de agrupaciones de alternativas en un nivel de decisión, el número máximo posible de alternativas se calcularía a partir de la expresión:

$$N\ max = \sum_{i=0}^{m-1} \frac{m!}{i!\,(m-i)!}$$

Donde, m = Número total de alternativas individuales Los expertos definirán que agrupaciones de alternativas son factibles para incluirlas antes de realizar la valoración.

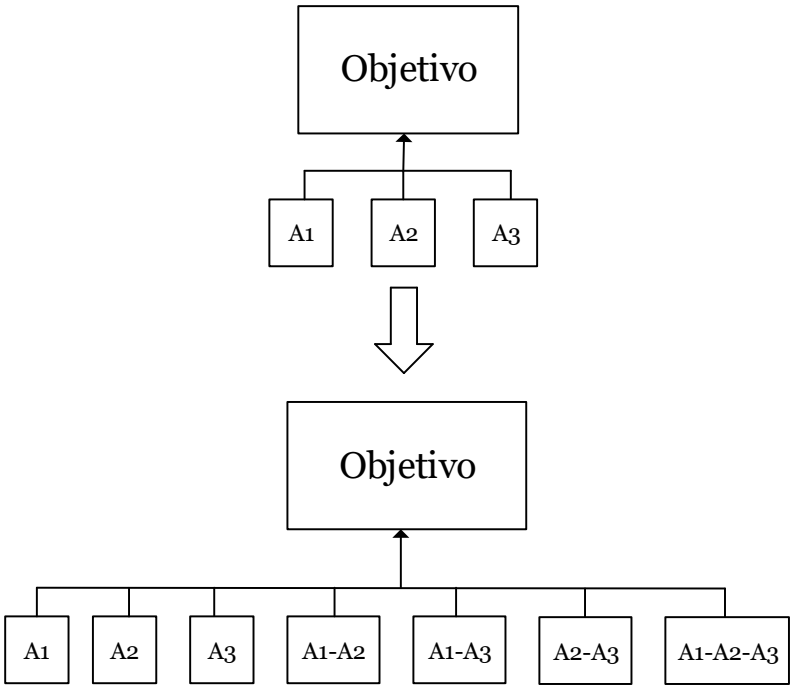


Figura 34. Agrupación de alternativas.

Esquema general de la valoración de diagramas de Ishikawa mediante métodos multicriterio.

A_i: Conjunto de alternativas planteadas para el desarrollo de un Obj SC_K''.

Obj SC_K'': Objetivo específico asociado a una SC_K'' (sub causa externa del diagrama).

ASC_k'': Conjunto de alternativas seleccionadas para el desarrollo de un Obj SC_K'' planteadas como alternativas para el desarrollo de un Obj SCk'.

Obj SC_k': Objetivo específico asociado a una SCk' (Sub causa del diagrama).

ASC_k': Conjunto de alternativas seleccionadas para el desarrollo de un Obj SC_K' planteadas como alternativas para el desarrollo de un Obj C_K.

Obj C_k: Objetivo específico asociado a una C_K (Causa del diagrama)

ASCk: Conjunto de alternativas seleccionadas para el desarrollo de un Obj C_K planteadas como alternativas para el desarrollo de un Obj G.

AC_K: Conjunto de alternativas seleccionadas para el desarrollo de un Obj G.

Obj G: Objetivo General planteado a partir del efecto del diagrama.

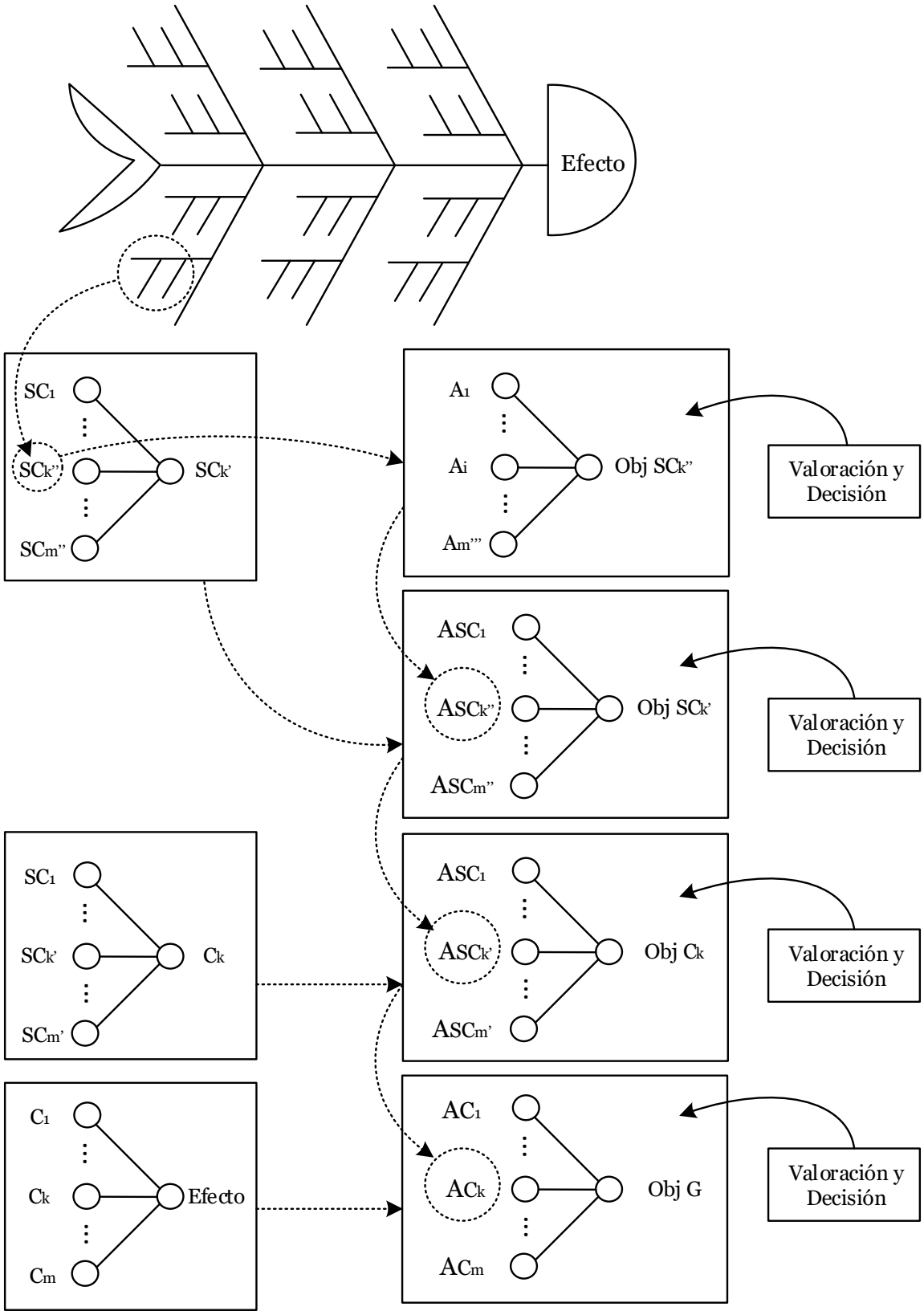


Figura 35. Esquema general para la valoración de diagramas de Ishikawa.

Pasos para la creación de un nivel de decisión:

1. *Determinar el objetivo de decisión que será usado como punto de referencia para la valoración.*
2. *Determinar las alternativas de decisión relacionadas con el objetivo de decisión.*

Una sub causa exterior podría ser expresada en términos de múltiples alternativas de solución. En este caso surgiría otro nivel de decisión conformado por este conjunto de alternativas y la sub causa exterior expresada como un objetivo específico.

Valoración de un nivel de decisión:

NOTA: Los siguientes pasos deben realizarse para cada uno de los niveles de decisión del diagrama de forma individual, las decisiones tomadas en cada nivel conformarán la información de entrada para niveles superiores, por lo tanto, este procedimiento se realiza reiterativamente hasta que la decisión tomada en uno de los niveles determine como se llevará a cabo el logro del objetivo general. La ponderación global de cada una de las alternativas será determinada después de haber valorado todos los niveles del diagrama.

1. *Determinar los criterios de decisión:*

Estos dependen de la naturaleza del problema y de las alternativas disponibles para solucionarlo.

2. *Creación de la matriz de decisión:*

Deberán evaluarse las alternativas respecto a cada criterio elegido, a partir de la información disponible y/o la emisión de juicios.

3. *Elección del método(s) multicriterio:*

La elección del método(s) deberá realizarse con base en los siguientes diagramas de flujo:

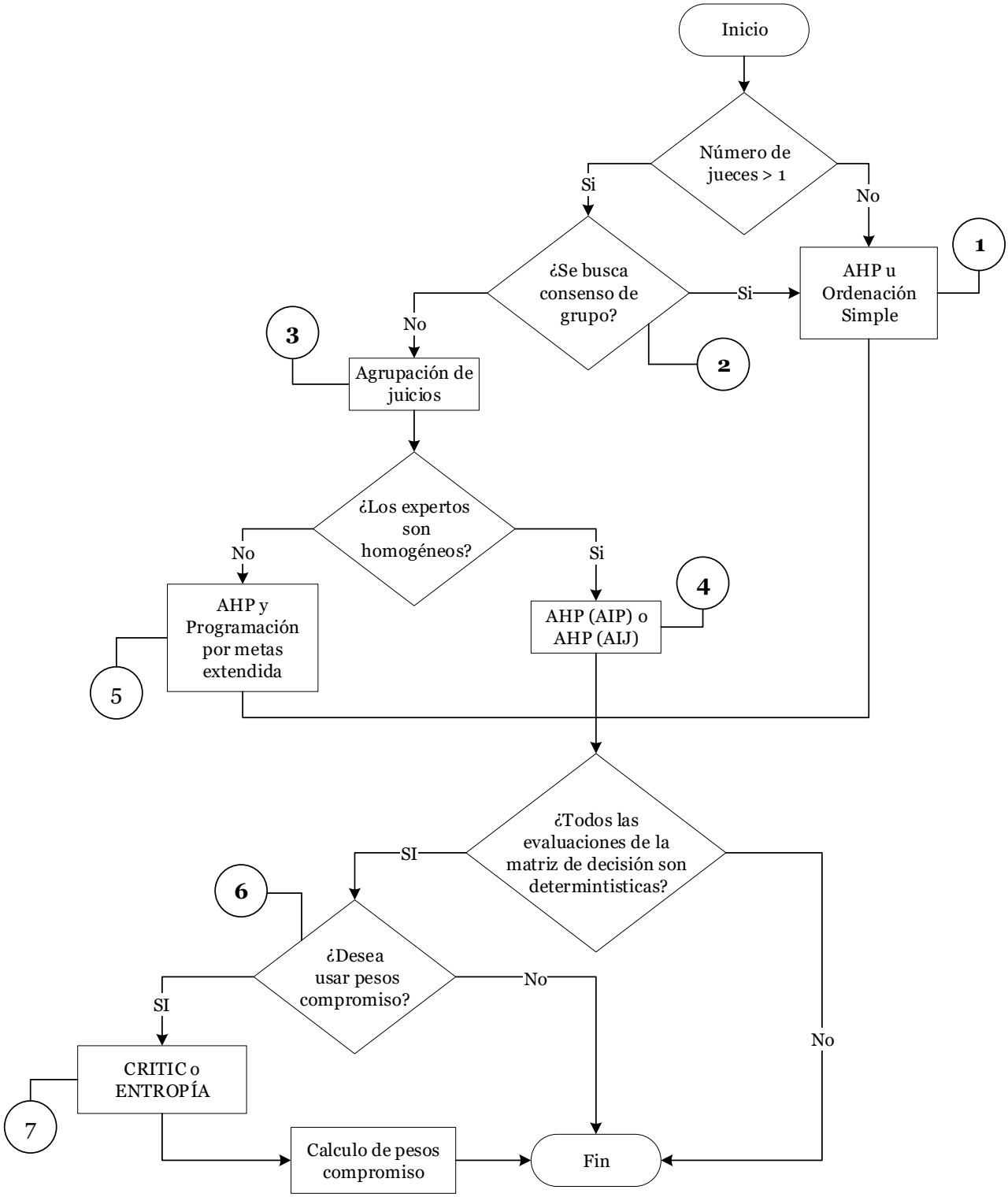


Figura 36. Elección del método para ponderación de criterios.

Consideraciones en la elección del método para la ponderación de criterios:

1 ¿AHP u Ordenación Simple?

Se limita el uso del método Ordenación simple a aquellas situaciones donde el número de jueces es igual a 1 o se busca consenso cuando se tienen jueces múltiples.

El método de ordenación simple es más subjetivo que el método AHP, no ofrece ningún tipo de validación, resulta útil cuando se cuenta con muy poca o nula información y su aplicación es rápida y sencilla.

El método AHP es más robusto porque realiza una comparación pareada entre criterios e incorpora la medición de la consistencia de los juicios emitidos, y por lo tanto sus resultados brindan una mayor confiabilidad.

2 Consenso de grupo

El consenso podría enriquecer el proceso de toma de decisiones, el tiempo necesario para la aplicación de los métodos aumenta o disminuye en función de la divergencia de las opiniones de los miembros del grupo.

3 Agregación de Juicios

La agregación de juicios es utilizada en aquellas situaciones en donde se considere que llegar a un consenso requerirá de mucho tiempo o no será posible.

4 ¿AHP (AIP) o AHP (AIJ)?

Los métodos AHP (AIJ) y AHP (AIP) difieren en el número de agregaciones que se deben realizar, estas son considerablemente mayores en AHP (AIJ), sin embargo, los resultados obtenidos son muy similares.

5 AHP y Programación por metas extendidas

Cuando los juicios emitidos son muy divergentes, es decir, provienen de grupos de jueces heterogéneos resulta conveniente el uso de AHP y programación por metas extendida, como una forma de identificar la solución que más se acerca a la opinión de cada uno de los jueces.

6 Pesos compromiso

Una ponderación compromiso puede conducir a la toma de decisiones integrales: permite agregar las preferencias subjetivas de un decisor y las ponderaciones objetivas, calculadas a partir de la información intrínsecamente aportada por los datos. Un criterio pierde poder de discriminación cuando las evaluaciones de las alternativas respecto a este, son muy similares. Los métodos de Entropía y CRITIC permiten evaluar está perdida de discriminación y definir la ponderación objetiva de los criterios.

7 ¿CRITIC o ENTROPÍA?

El método CRITIC no puede ponderar criterios en aquellas situaciones en donde se consideren únicamente dos alternativas de decisión. El método entropía no admite evaluaciones con valores menores o iguales a cero.

El método CRITIC tiene en cuenta si la función de criterio representa un costo o un beneficio al considerar la normalización por el rango, por otro lado, el método entropía utiliza la normalización por suma y no tiene en cuenta esta consideración. Las ponderaciones obtenidas por cada uno de estos métodos pueden llegar a ser muy distintas.

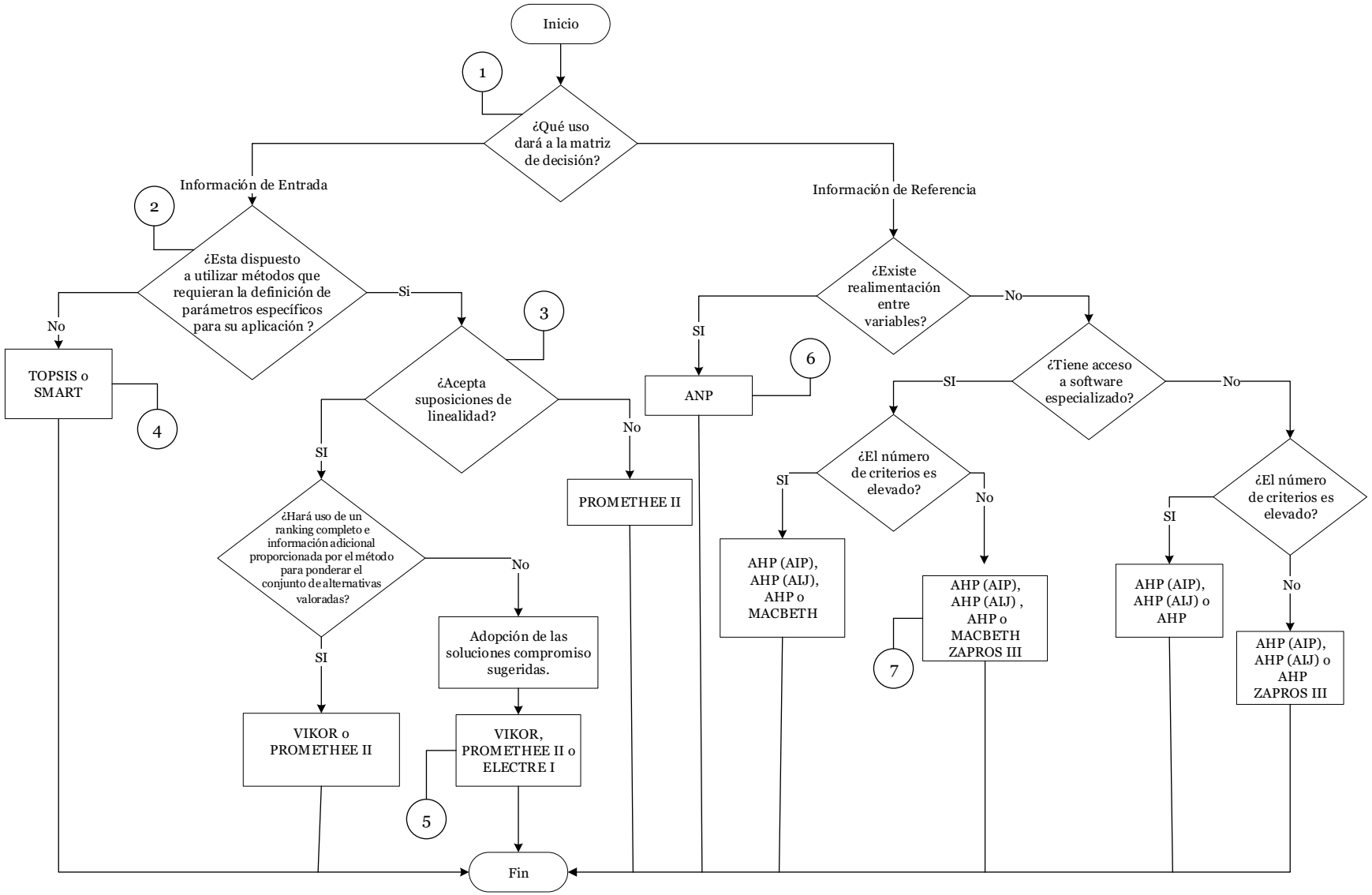


Figura 37. Elección del método para valoración de alternativas.

Consideraciones en la elección del método para la valoración de alternativas:

1 **Uso de la matriz de decisión**

Los métodos TOPSIS, VIKOR, PROMETHE II, ELECTRE I Y SMART, utilizan a la matriz de decisión como información de entrada, esto implica que el tomador de decisiones no deberá emitir juicios para valorar las alternativas, a menos que deba establecer las evaluaciones de la matriz de decisión a través de variables lingüísticas y hacer uso de números difusos.

2 **Parámetros específicos para la aplicación de un método**

Los métodos VIKOR, PROMETHEE II y ELECTRE I, requieren para su aplicación, la definición de parámetros específicos:

VIKOR: deberá definirse el veto (v), que representa la importancia relativa entre la utilidad máxima de grupo y el mínimo arrepentimiento individual.

PROMETHEE II: deben determinarse los parámetros (q, p, s) que definen a cada uno de los criterios generalizados.

ELECTRE I: El tomador de decisiones puede calcular los índices de concordancia y discordancia de forma genérica o definirlos de acuerdo a su juicio.

3 **Suposiciones de Linealidad**

Los métodos VIKOR, TOPSIS, ELECTRE I y SMART, asumen la existencia de linealidad entre las funciones de utilidad y la preferencia de un decisor.

El tomador de decisiones puede tener una percepción diferente respecto al comportamiento de las variables involucradas en esta suposición.

Los métodos ANP, AHP, MACBETH y ZAPROS, pueden modelar estos comportamientos no lineales. El método PROMETHEE II, incorpora un criterio generalizado no lineal y cinco criterios generalizados lineales.

4 ¿SMART O TOPSIS?

SMART no admite evaluaciones numéricas de intervalo en la matriz de decisión. Las valoraciones numéricas de intervalo pueden ser expresadas como números difusos trapezoidales, sin embargo, debe tenerse en cuenta que, aunque SMART admite evaluaciones numéricas difusas, se hace necesaria la defuzzificación de los resultados obtenidos.

TOPSIS puede integrar fácilmente variables numéricas determinísticas, de intervalo y difusas en la valoración.

5 ¿VIKOR, PROMETHEE II O ELECTRE?

VIKOR, PROMETHEE II y ELECTRE I pueden integrar fácilmente variables numéricas determinísticas, de intervalo y difusas en la valoración.

El tomador de decisiones incorpora sus preferencias a través de los pesos de los criterios y los parámetros específicos que deben definirse en cada método: Los métodos pueden iniciar sin la participación interactiva del tomador de decisiones.

ELECTRE I resulta útil para identificar un conjunto de alternativas superiores a las demás, sin embargo, los resultados obtenidos pueden no ser concluyentes debido a la posible existencia de intransitividad en las relaciones de dominación existentes entre las alternativas de decisión.

6 ANP

El método ANP considera la existencia de dependencia y retroalimentación entre variables. Identifica y modela estas relaciones para incluirlas en el proceso decisional, como factores que pueden afectar los resultados de una decisión.

7 ¿AHP, MACBETH o ZAPROS III?

Los métodos AHP, MACBETH y ZAPROS III proporcionan al tomador de decisiones herramientas para la validación de los juicios emitidos, a través de la razón de consistencia, la verificación de la consistencia semántica y las contradicciones encontradas en el algoritmo de identificación de alternativas no dominadas, respectivamente. Estos métodos hacen uso de axiomas completos y lógicos para justificar sus enfoques.

Como se había mencionado anteriormente AHP posibilita la participación de múltiples jueces y la agregación de sus juicios. La participación de múltiples jueces en MACBETH y ZAPROS III, está limitada al conceso de los juicios emitidos.

MACBETH puede utilizar como base de comparación de cada criterio a las evaluaciones de alternativas de decisión, alternativas de referencia o niveles de desempeño cualitativos y cuantitativos definidos por el tomador de decisiones. El acceso al software especializado es un requisito para su uso, sin embargo, este proporciona herramientas que hacen de MACBETH un método flexible y robusto.

El método ZAPROS III crea reglas de decisión para valorar alternativas a partir de la comparación pareada de un conjunto de posibles valores discretos y categóricos que puede tener cada función de criterio. Un número de criterios mayor implica un aumento exponencial de las comparaciones pareadas que deben realizarse, aumentando el tiempo de aplicación del método. Otro factor que debe ser tenido en cuenta es la necesidad de clasificar la evaluación de una alternativa respecto a un criterio bajo una de las categorías identificadas, cuando estas provienen de un conjunto continuo de posibles valores.

4. *Calculo de las preferencias individuales:*

La finalidad de los métodos AHP y ANP es obtener las preferencias individuales, expresadas como una ponderación, para cada una de las alternativas consideradas. Para los métodos MACBETH, SMART, TOPSIS, VIKOR, ZAPROS III, ELECTRE I y PROMETHEE II debe establecerse un procedimiento adicional para expresar los resultados obtenidos por estos métodos, de forma tal que puedan ser comparables:

TOPSIS: Determina el ranking de las alternativas en función de un índice que agrega las distancias a la solución ideal y anti ideal. Puede utilizarse la normalización por suma de dicho índice para calcular la preferencia individual de cada alternativa.

VIKOR: Determina el ranking de las alternativas utilizando la función de agregación Q, que representa la "cercanía al ideal", calculada a partir de la agregación de la función de utilidad máxima de grupo S y la función de arrepentimiento individual R.

Debido a que el valor de cada alternativa en la función Q y la posición en el ranking es inversa y dado que dichos valores se encuentran en una escala de 0 a 1, se propone: calcular la diferencia entre 1 y cada uno de estos valores para que la relación entre el valor de cada alternativa en la función Q y su posición en el ranking sea directa. Sumar los valores Q de las alternativas pertenecientes al kernel, de acuerdo a la condición de ventaja aceptable y la condición de estabilidad aceptable en la toma de decisiones, para determinar el valor de una alternativa que representará al kernel. Ponderar las alternativas por medio de la normalización por suma del conjunto total de alternativas y calcular la ponderación final para cada una de las alternativas pertenecientes al kernel, dividiendo la ponderación obtenida por la alternativa representativa, en el número total de alternativas pertenecientes al kernel. Asegurando de esta forma que dichas alternativas tengan la misma ponderación.

ZAPROS: La preferencia individual hacia cada alternativa podría estimarse a través de la normalización por la suma de los valores otorgados por el índice FIQ para cada alternativa. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que las variaciones de calidad no siempre son proporcionales. Debido a que la relación entre los valores del índice FIQ y la preferencia individual hacia cada alternativa son inversos, la ponderación de cada alternativa será igual a 1 menos el valor normalizado correspondiente.

PROMETHEE: PROMETHEE II utiliza los Flujos Netos para determinar las relaciones de superación y obtener un ranking completo. Los flujos netos pueden utilizarse para estimar las preferencias individuales hacia cada alternativa: La ponderación se obtendrá normalizando los flujos netos por el rango y posteriormente normalizándolos por suma. Si dos alternativas tienen el mismo flujo neto, son indiferentes entre sí y tendrán la misma ponderación.

ELECTRE: Para estimar las preferencias individuales hacia cada alternativa, podrían utilizarse los resultados obtenidos en la matriz de dominancia agregada de dos formas:

1. Mediante la creación del grafo, se clasifican las alternativas por niveles, el ranking obtenido se normaliza por la suma. La alternativa o conjunto de alternativas que pertenecen al kernel, serán asignadas al nivel más alto.

2. Considerar únicamente la(s) alternativa(s) pertenecientes al Kernel, identificado por el método, otorgándole la misma ponderación a cada una de ellas.

MACBETH: Puede utilizarse la normalización por suma de los puntajes globales de cada alternativa proporcionados por el método, para expresar la preferencia individual como una ponderación.

SMART: Puede utilizarse la normalización por suma de utilidad global de cada alternativa proporcionada por el método, para expresar la preferencia individual como una ponderación.

5. *Análisis de resultados y toma de la decisión del nivel.*

El tomador de decisiones se verá inmerso en alguna de las siguientes 2 situaciones:

Situación 1.

La contribución de cada una de las alternativas consideradas, al logro del objetivo, es acumulable: La decisión consistirá en definir el mejor conjunto de alternativas factible, teniendo en cuenta el orden de prioridad establecido a través de la aplicación de un método multicriterio.

Las alternativas que no sean consideradas parte de ese conjunto, serán descartadas. La ponderación de las alternativas seleccionadas, deberá normalizarse por suma. Cuando todas las alternativas valoradas sean consideradas parte del conjunto factible de alternativas, se conservarán las ponderaciones otorgadas por el método.

Situación 2.

El tomador de decisiones considera a priori que la decisión consistirá en elegir la mejor alternativa. La alternativa seleccionada, tendrá una ponderación igual a 1. Las demás alternativas serán descartadas.

Cálculo de las prioridades globales:

La ponderación individual asignada a cada una de las alternativas pertenecientes a un nivel de decisión, mide el grado de preferencia individual de cada alternativa en relación al objetivo del nivel de decisión.

La prioridad global individual de una alternativa, se obtiene multiplicando todas las ponderaciones asociadas a dicha alternativa, por su ponderación individual.

Se considera que una ponderación está asociada a una alternativa, cuando la alternativa hace parte del conjunto de acciones que conforman a otra alternativa perteneciente a un nivel superior que obtuvo dicha ponderación.

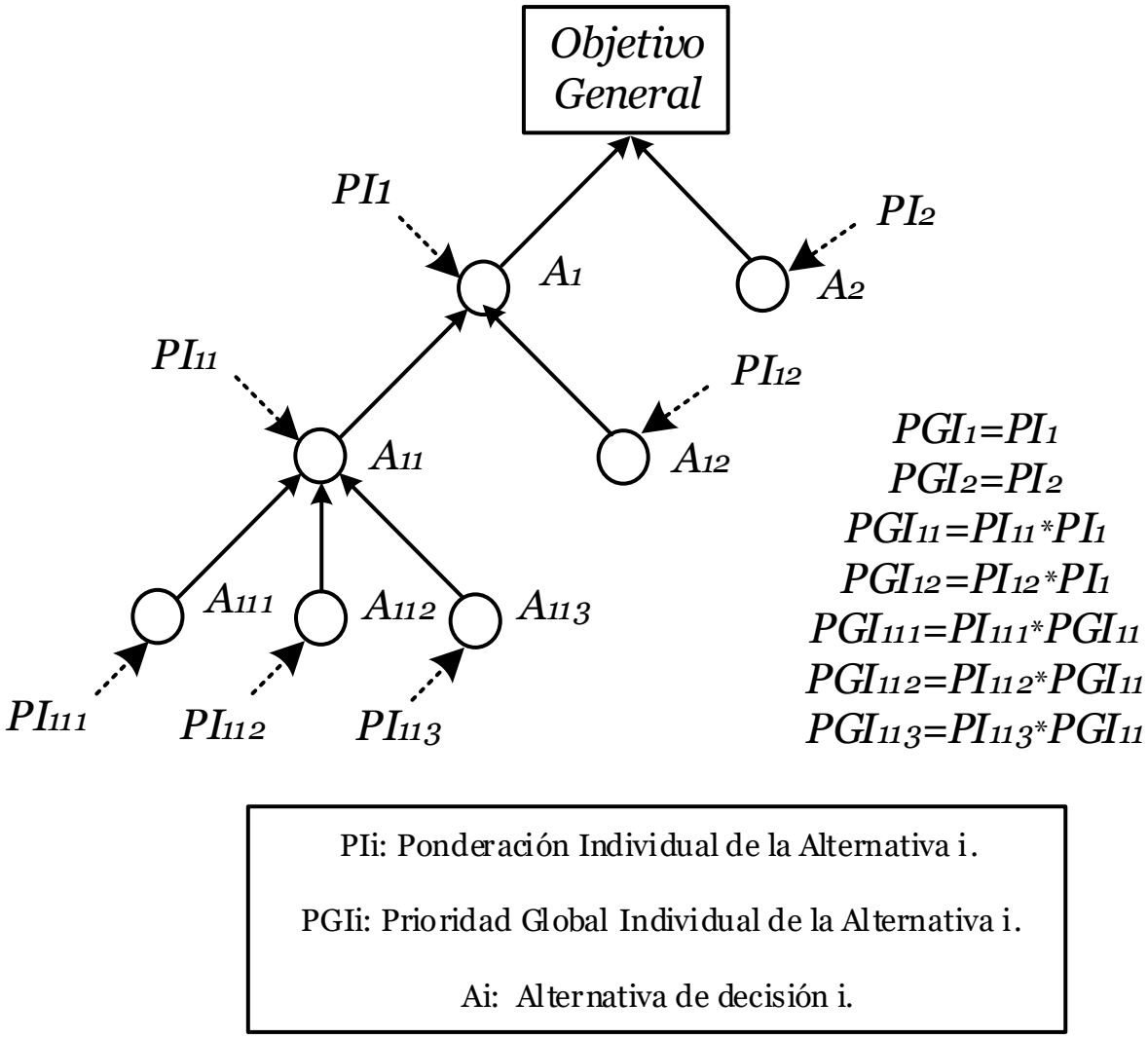


Figura 38. Cálculo de las prioridades globales individuales.

Toma de la decisión final:

Considerando únicamente las prioridades globales individuales de las alternativas planteadas a partir de las sub causas o causas exteriores del diagrama, la decisión final consistirá en seleccionar el mejor conjunto factible de alternativas, en función de las prioridades globales individuales establecidas.

3.4 Ejemplificación del modelo.

Para ilustrar al lector la aplicabilidad del modelo propuesto, se considerará el siguiente ejemplo:

Una empresa buscar resolver un problema de retrasos en la hora de llegada del personal a sus instalaciones. La persona encargada de talento humano creo un diagrama de Ishikawa donde se pueden evidenciar las distintas causas y sub causas del problema identificadas.

Los directivos utilizaran esta información para definir y elegir los cursos de acción que contribuyan de mejor forma a la solución del problema:

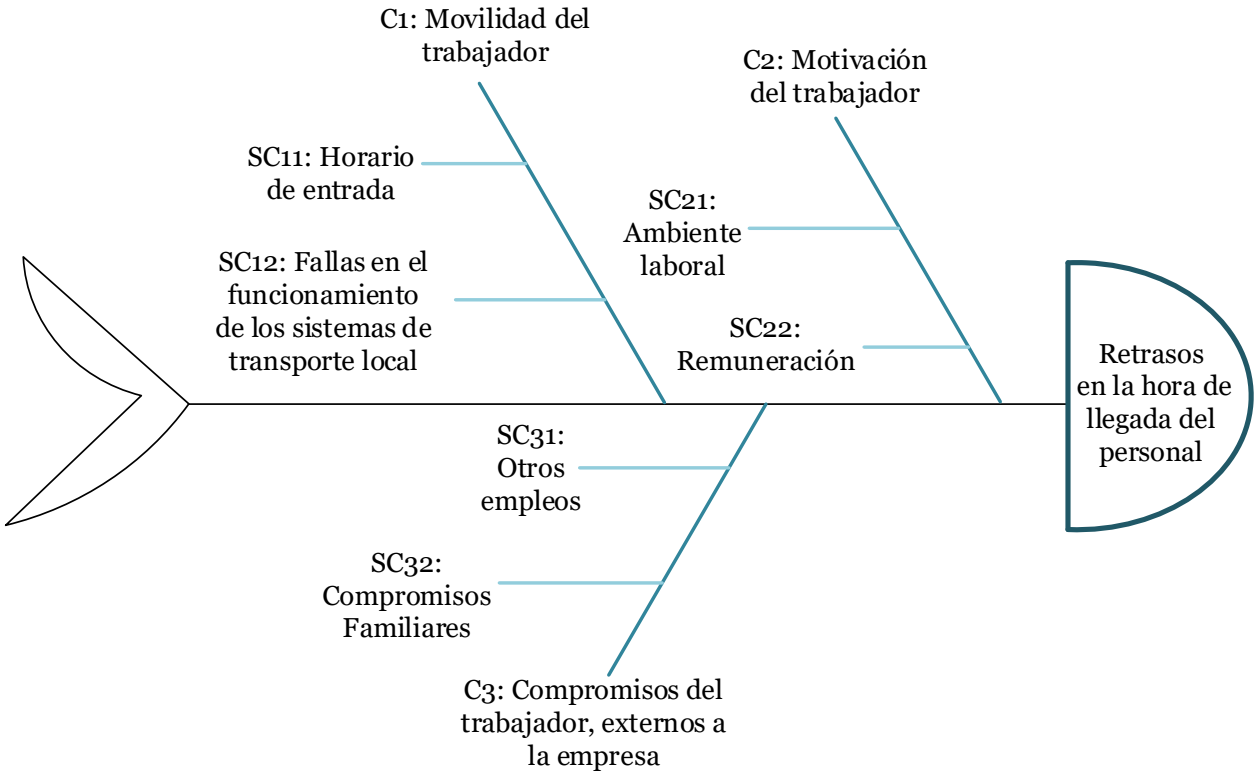


Figura 39. Diagrama de Ishikawa, ejemplo ilustrativo.

Como se observa en la *figura x. DI.* existen tres causas directas identificadas: C1 Movilidad del trabajador, C2 motivación del trabajador y C3 compromisos del trabajador, externos a la empresa, cada una de ellas con sus respectivas sub causas (SC).

Definición de Objetivos y Alternativas de solución:

Para dar solución adecuada a esta situación, se propone plantear el efecto del diagrama como un objetivo general de la problemática a resolver y las causas y sub causas como objetivos específicos.

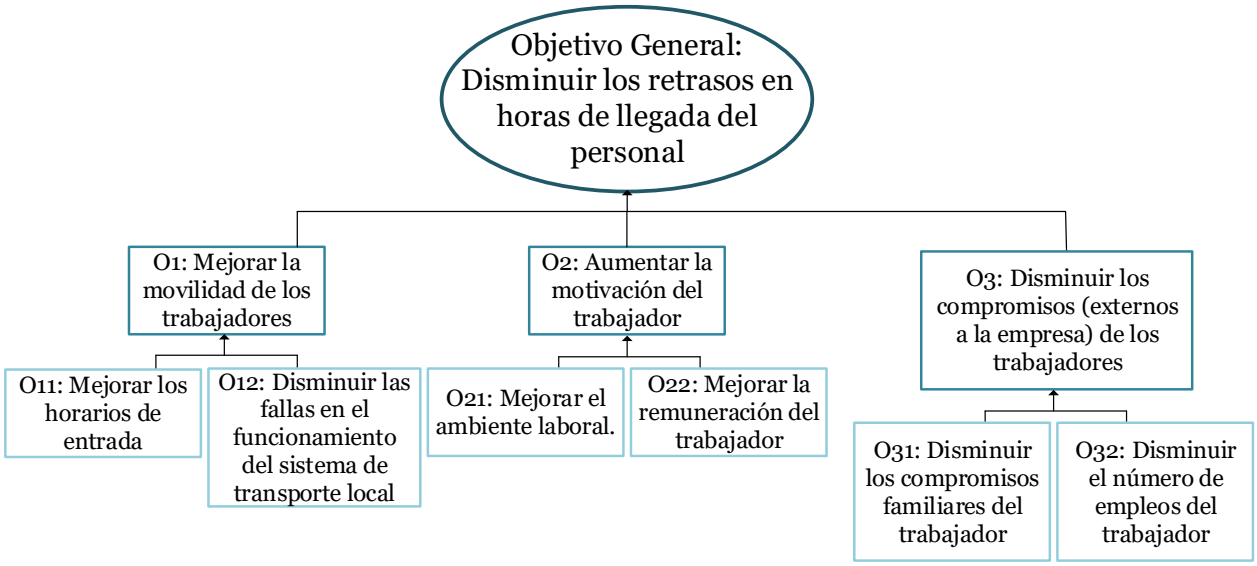


Figura 40. Definición de objetivos a partir de causas y sub causas del Diagrama de Ishikawa.

Identificar y Excluir el conjunto de objetivos no factibles:

Posteriormente debe identificarse el conjunto de objetivos no factibles, asociados a causas o sub causas no controlables, que será excluido del problema:

El tomador de decisiones definió que la causa directa C3: Compromisos del trabajador, externos a la empresa, no es controlable, por lo tanto, no es posible definir acciones factibles que permitan el logro del objetivo O3.

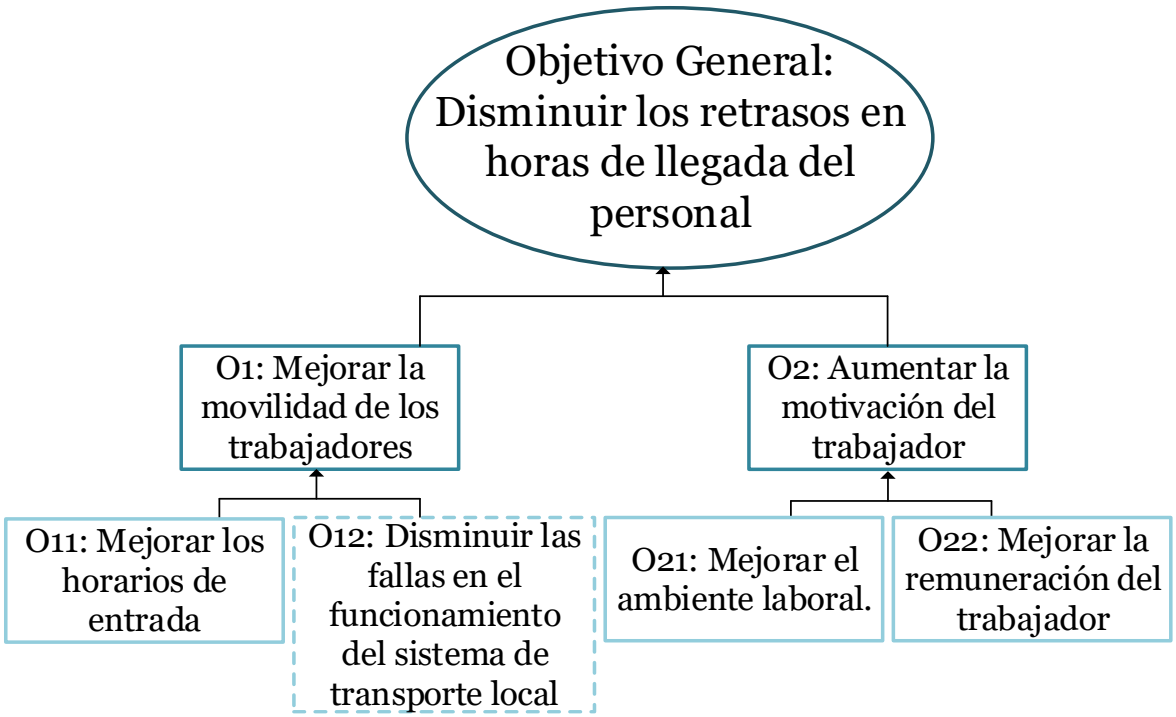


Figura 41. Identificación de Objetivos no factibles.

El objetivo O12 tampoco es controlable, pero la sub causa SC12 puede ser expresada como una alternativa de decisión A22 que contribuye al logro del Objetivo O1:

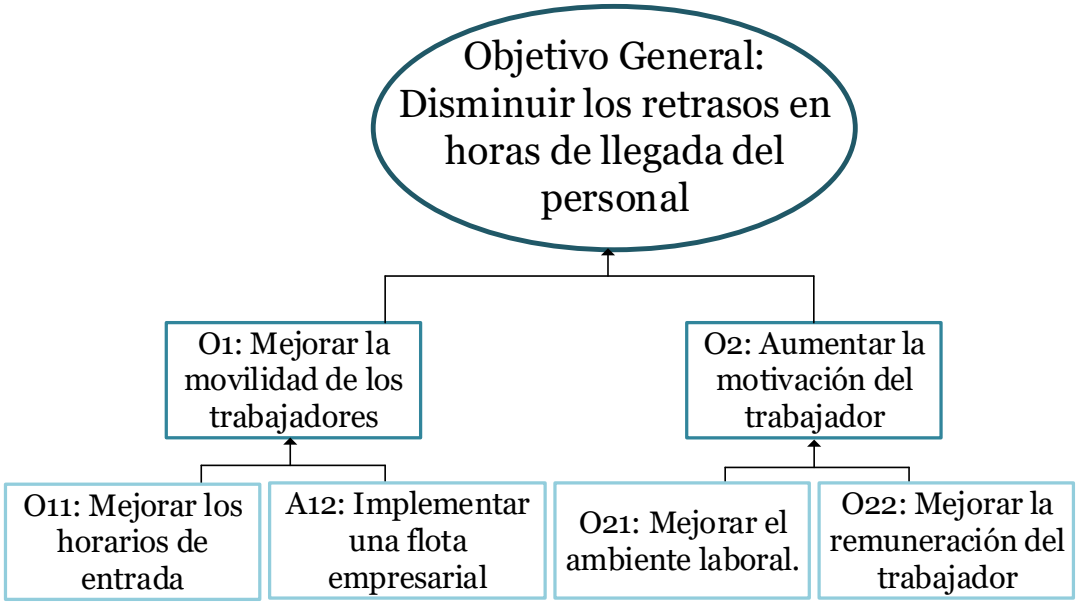


Figura 42. Planteamiento de objetivos no factibles como alternativas.

Plantear las alternativas de decisión factibles:

Los objetivos factibles restantes, expresados a partir de causas o sub causas exteriores controlables, deben plantearse como alternativas de decisión expresadas como acciones concretas de solución:

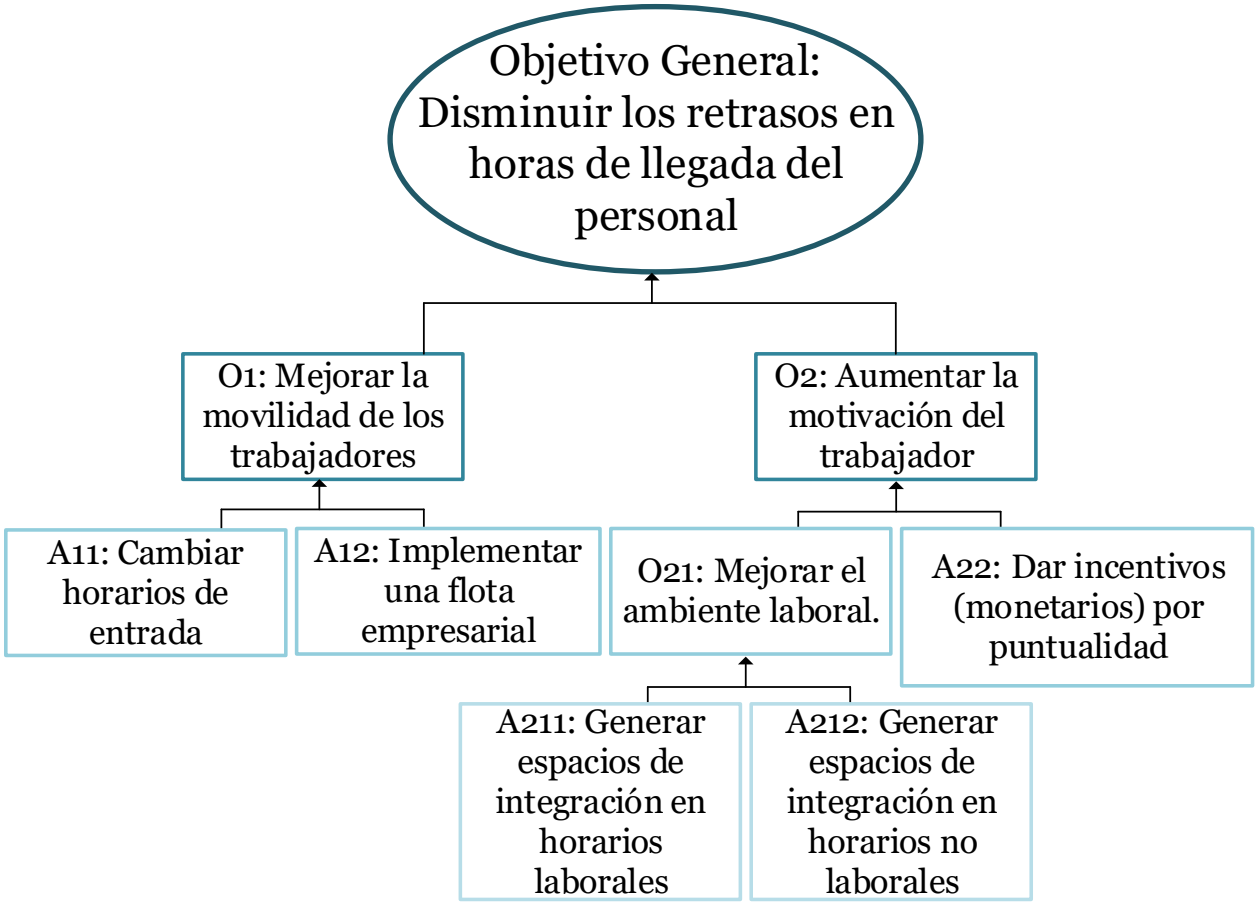


Figura 43. Planteamiento de alternativas de decisión factibles.

Observe que el objetivo O21, no pudo ser expresado como una única acción y se contemplan dos alternativas de decisión: A211 y A212.

Construir los niveles de decisión:

Para poder valorar el nivel de decisión ND 2, primero debe ser valorado el nivel de decisión ND 2.1. De igual forma para poder valorar el nivel ND General, primero deben ser valorados los niveles de decisión ND 1 y ND 2. Esta afirmación se justifica en el hecho de que las acciones concretas que conforman a las alternativas asociadas a las causas o sub

causas relacionadas directamente con los O2 y O General, serán definidas a través de las decisiones tomadas en los niveles inferiores.

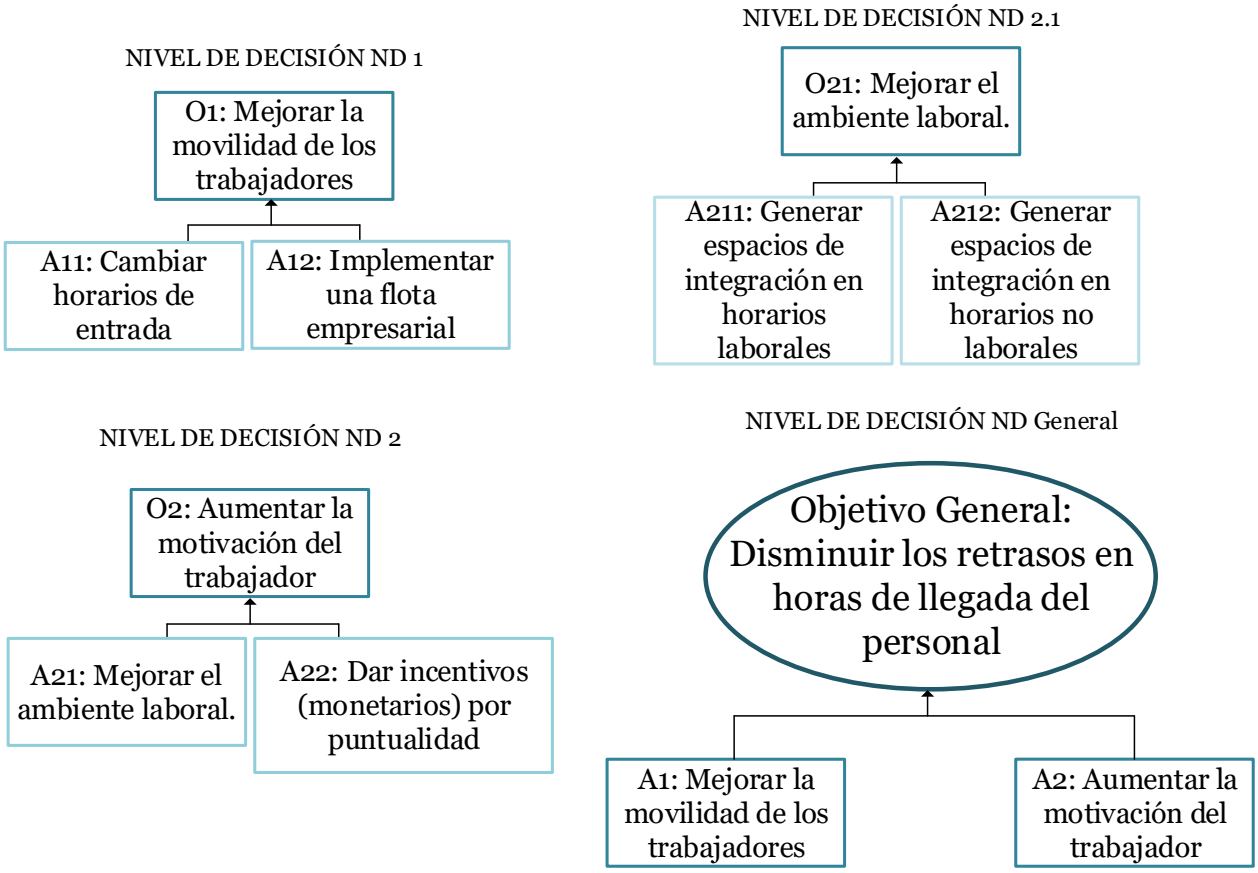


Figura 44. Construcción de los niveles de decisión.

Valoración de un *nuevo* nivel de decisión ND 1.2:

La Alternativa A12: Implementar una flota empresarial, puede considerarse como un objetivo O12, debido a la existencia de múltiples alternativas de decisión asociadas, conformando un nuevo nivel de decisión ND 1.2:

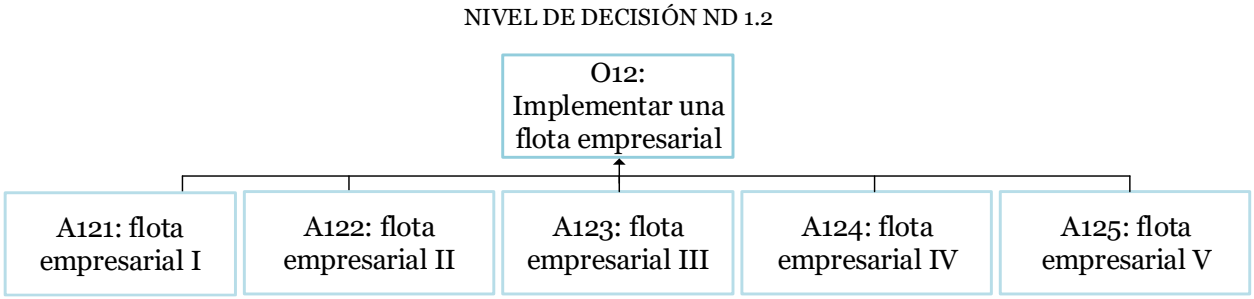


Figura 45. Nivel de decisión ND 1.2.

1. *Determinar los criterios de decisión:*

Criterio que mide el impacto (C1): impacto esperado en la mejora de la movilidad de los trabajadores. medido a través de variables lingüísticas: muy bajo, bajo, medio, alto, muy alto.

Criterio que mide el recurso (C2): Dinero requerido para el sostenimiento de la alternativa ($/mes). En miles de pesos.

(C3): Reputación de la Agencia de buses contratada *medida a través de variables lingüísticas: muy mala, mala, media, buena, muy buena.*

(C4): Estado de los buses *medido a través de variables lingüísticas: muy malo, malo, medio, bueno, muy bueno.*

(C5): Capacidad de los buses *medido a través de variables lingüísticas: muy baja, baja, media, alta, muy alta.*

2. *Creación de la matriz de decisión:*

Se utilizarán las siguientes escalas para transferir las variables lingüísticas a números triangulares difusos:

Tabla 9. Escala de transferencia de variables lingüísticas a números triangulares difusos, Criterio 1, Nivel de decisión ND 1.2.

Variable Lingüística	**Número triangular Difuso Asociado**
Muy Alto	*(0.9,1,1)*
Alto	*(0.7,0.9,1)*
Medio	*(0.3,0.5,0.7)*
Bajo	*(0.1,0.3,0.5)*
Muy Bajo	*(0.1,0.1,0.3)*

Tabla 10. Escala de transferencia de variables lingüísticas a números triangulares difusos, Criterio 3, Nivel de decisión ND 1.2.

Variable Lingüística	**Número triangular Difuso Asociado**
Muy Buena	*(0.8,0.9,1)*
Buena	*(0.7,0.8,0.9)*
Media	*(0.3,0.5,0.7)*
Mala	*(0.3,0.3,0.5)*
Muy Mala	*(0.1,0.1,0.3)*

Tabla 11. Escala de transferencia de variables lingüísticas a números triangulares difusos, Criterio 4, Nivel de decisión ND 1.2.

Variable Lingüística	**Número triangular Difuso Asociado**
Muy Bueno	*(0.7,0.8,1)*
Bueno	*(0.6,0.7,0.8)*
Medio	*(0.4,0.6,0.8)*
Malo	*(0.3,0.4,0.5)*
Muy Malo	*(0.1,0.2,0.3)*

Tabla 12. Escala de transferencia de variables lingüísticas a números triangulares difusos, Criterio 5, Nivel de decisión ND 1.2.

Variable Lingüística	**Número triangular Difuso Asociado**
Muy Alta	*(0.9,1,1)*
Alta	*(0.7,0.8,0.9)*
Media	*(0.5,0.6,0.7)*
Baja	*(0.3,0.4,0.5)*
Muy Baja	*(0.1,0.2,0.3)*

3. *Elección del método(s) multicriterio:*

Elección del método multicriterio para la ponderación de criterios:

Para la construcción de la matriz de decisión se hizo uso de variables lingüísticas expresadas como números triangulares difusos, que agrupan las evaluaciones de tres jueces*: director general, encargada de talento humano, gerente financiero.*

Tabla 13. Matriz de decisión, Juez 1, Nivel de decisión ND 1.2.

	C1	**C2**	**C3**	**C4**	**C5**
A121	*(0.7,0.9,1)*	3000	*(0.3,0.5,0.7)*	*(0.1,0.2,0.3)*	*(0.3,0.4,0.5)*
A122	*(0.9,1,1)*	2800	*(0.3,0.3,0.5)*	*(0.3,0.4,0.5)*	*(0.3,0.4,0.5)*
A123	*(0.7,0.9,1)*	3000	*(0.1,0.1,0.3)*	*(0.3,0.4,0.5)*	*(0.7,0.8,0.9)*
A124	*(0.1,0.3,0.5)*	3200	*(0.7,0.8,0.9)*	*(0.6,0.7,0.8)*	*(0.7,0.8,0.9)*
A125	*(0.3,0.5,0.7)*	3400	*(0.3,0.5,0.7)*	*(0.6,0.7,0.8)*	*(0.7,0.8,0.9)*

Tabla 14. Matriz de decisión, Juez 2, Nivel de decisión ND 1.2.

	C1	**C2**	**C3**	**C4**	**C5**
A121	*(0.7,0.9,1)*	3000	*(0.7,0.8,0.9)*	*(0.1,0.2,0.3)*	*(0.3,0.4,0.5)*
A122	*(0.9,1,1)*	2800	*(0.3,0.3,0.5)*	*(0.3,0.4,0.5)*	*(0.5,0.6,0.7)*
A123	*(0.7,0.9,1)*	3000	*(0.1,0.1,0.3)*	*(0.4,0.6,0.8)*	*(0.7,0.8,0.9)*
A124	*(0.3,0.5,0.7)*	3200	*(0.7,0.8,0.9)*	*(0.6,0.7,0.8)*	*(0.7,0.8,0.9)*
A125	*(0.3,0.5,0.7)*	3400	*(0.7,0.8,0.9)*	*(0.6,0.7,0.8)*	*(0.7,0.8,0.9)*

Tabla 15. Matriz de decisión, Juez 3, Nivel de decisión ND 1.2.

	C1	**C2**	**C3**	**C4**	**C5**
A121	*(0.3,0.5,0.7)*	3000	*(0.3,0.5,0.7)*	*(0.1,0.2,0.3)*	*(0.3,0.4,0.5)*
A122	*(0.7,0.9,1)*	2800	*(0.3,0.3,0.5)*	*(0.3,0.4,0.5)*	*(0.5,0.6,0.7)*
A123	*(0.7,0.9,1)*	3000	*(0.1,0.1,0.3)*	*(0.6,0.7,0.8)*	*(0.5,0.6,0.7)*
A124	*(0.3,0.5,0.7)*	3200	*(0.8,0.9,1)*	*(0.6,0.7,0.8)*	*(0.7,0.8,0.9)*
A125	*(0.3,0.5,0.7)*	3400	*(0.7,0.8,0.9)*	*(0.6,0.7,0.8)*	*(0.7,0.8,0.9)*

Para la ponderación de criterios se utilizará un método que permita llevar a cabo un consenso entre los 3 jueces, se elige el método AHP porque se considera que se tiene información suficiente para llevar a cabo la comparación pareada de criterios y se considera que no será difícil llegar al consenso: Los jueces persiguen el mismo objetivo y tienen posiciones similares frente al problema.

Tabla 16. Matriz de comparación pareada (Criterios), AHP con consenso, Nivel de decisión ND 1.2.

	C1	**C2**	**C3**	**C4**	**C5**	**Ponderación**
C1	1	1/2	1	5	5	0,261
C2	2	1	1/3	3	3	0,239
C3	1	3	1	5	5	0,374
C4	1/5	1/3	1/5	1	1	0,063
C5	1/5	1/3	1/5	1	1	0,063

CR: 6.5%

Elección del método multicriterio para la valoración de alternativas:

Dado que la matriz de decisión contiene evaluaciones cuantitativas, se hará uso de ella como información de entrada. Se acepta la linealidad entre las funciones de criterio y la utilidad del decisor. Se elige al método TOPSIS porque no requiere la definición de parámetros adicionales y se asume que las distancias a la solución ideal positiva y negativa tienen la misma importancia.

Tabla 17. Matriz de decisión Agregada, TOPSIS, Nivel de decisión ND 1.2.

	MAX	MIN	MAX	MAX	MAX
	26.1	23.9	37.4	6.3	6.3
	C1	C2	C3	C4	C5
A121	(0.3 , 0.8 , 1)	3000	(0.3 , 0.6 , 0.9)	(0.1 , 0.2 , 0.3)	(0.3 , 0.4 , 0.5)
A122	(0.7 , 0.97 , 1)	2800	(0.3 , 0.3 , 0.5)	(0.3 , 0.4 , 0.5)	(0.3 , 0.5 , 0.7)
A123	(0.7 , 0.9 , 1)	3000	(0.1 , 0.1 , 0.3)	(0.3 , 0.6 , 0.8)	(0.5 , 0.7 , 0.9)
A124	(0.1 , 0.4 , 0.7)	3200	(0.7 , 0.8 , 1)	(0.6 , 0.7 , 0.8)	(0.7 , 0.8 , 0.9)
A125	(0.3 , 0.5 , 0.7)	3400	(0.3 , 0.7 , 0.9)	(0.6 , 0.7 , 0.8)	(0.7 , 0.8 , 0.9)

Tabla 18. Matriz de decisión normalizada ponderada, TOPSIS Nivel de decisión ND 1.2

	26.1	23.9	37.4	6.3	6.3
	C1	C2	C3	C4	C5
A121	(0.08 , 0.21 , 0.26)	0.223067	(0.11 , 0.22 , 0.5)	(0.01 , 0.02 , 0.02)	(0.02 , 0.03 , 0.04)
A122	(0.18 , 0.25 , 0.26)	0.239	(0.11 , 0.11 , 0.3)	(0.02 , 0.03 , 0.04)	(0.02 , 0.04 , 0.05)
A123	(0.18 , 0.23 , 0.26)	0.223067	(0.04 , 0.04 , 1)	(0.02 , 0.04 , 0.06)	(0.04 , 0.05 , 0.06)
A124	(0.03 , 0.11 , 0.18)	0.209125	(0.26 , 0.31 , 0.9)	(0.05 , 0.06 , 0.06)	(0.05 , 0.06 , 0.06)
A125	(0.08 , 0.13 , 0.18)	0.196824	(0.11 , 0.26 , 0)	(0.05 , 0.06 , 0.06)	(0.05 , 0.06 , 0.06)

Tabla 19. Distancias PIS, TOPSIS, Nivel de decisión ND 1.2.

	C1	C2	C3	C4	C5	Total
A121	0.06530	0.01593	0.25166	0.03938	0.02800	0.40026
A122	0	0	0.37513	0.02363	0.02104	0.41980
A123	0.01005	0.01593	0.21259	0.01493	0.00852	0.26201
A124	0.12914	0.02988	0	0	0	0.15901
A125	0.10306	0.04218	0.52753	0	0	0.67277

Tabla 20. Distancias NIS, TOPSIS, Nivel de decisión ND 1.2.

	C1	C2	C3	C4	C5	Total
A121	0.07749	0.02624	0.28948	0	0	0.39321
A122	0.12914	0.04218	0.19355	0.01575	0.0097	0.39033
A123	0.12314	0.02624	0.59328	0.02962	0.0225	0.79483
A124	0	0.0123	0.52753	0.03938	0.0280	0.60721
A125	0.03177	0	0	0.03938	0.0280	0.09914

Tabla 21. Resultados, TOPSIS, Nivel de decisión ND 1.2.

	D+	D-	D
A121	0.40026	0.39321	0.495558
A122	0.41980	0.39033	0.481811
A123	0.26201	0.79483	0.75208
A124	0.15901	0.60721	0.792469
A125	0.67277	0.09914	0.128438

4. *Calculo de las preferencias individuales:*

Tabla 22. Preferencias Individuales, Nivel de decisión ND 1.2.

	D	Prioridad
A121	0.495558	0.186978
A122	0.481811	0.181791
A123	0.75208	0.283766
A124	0.792469	0.299005
A125	0.128438	0.048461

5. *Análisis de resultados y toma de la decisión del nivel.*

Para este nivel se presenta la situación número 2 definida en el modelo, se elige a la alternativa con la mayor ponderación (A124) y se le otorga una prioridad igual a 1.

Valoración del nivel de decisión ND 1:

1. *Determinar los criterios de decisión:*

*Criterio que mide el impacto (*C1): impacto en la mejora de la movilidad de los trabajadores. medido como la reducción de la variabilidad en la duración del tiempo que tarda el trabajador en trasladarse hasta las instalaciones de la empresa desde su hogar de residencia en porcentaje (%).

*Criterio que mide el recurso (*C2): Dinero requerido para el sostenimiento de la alternativa ($/mes). En miles de pesos.

(C3): Acogida de la alternativa por parte de los trabajadores, media cualitativamente mediante las categorías: Muy Buena, Buena, Neutra, Mala o Muy mala.

2. *Creación de la matriz de decisión:*

Tabla 23. Matriz de Decisión, Nivel de decisión ND 1.

	C1	**C2**	**C3**
A11	50%	0	Mala
A12	90%	3000	Muy Buena

3. *Elección del método(s) multicriterio:*

Elección del método multicriterio para la ponderación de criterios:

Se cuenta con dos jueces para llevar a cabo la ponderación de los criterios (Encargada de talento humano y el director general). Aunque estos dos jueces pueden tener opiniones distintas son homogéneos porque persiguen el mismo objetivo: mejorar la situación actual de la empresa.

Se podrían aplicar los métodos AHP (AIJ), AHP (AIP) o llevar a cabo un consenso. Se elige el método AHP (AIJ) para llevar a cabo la ponderación de criterios debido a que se busca utilizar un método que genere confiabilidad en la decisión y se considera que podría ser difícil llegar a un consenso entre los dos jueces.

Tabla 24. Matriz de comparación pareada (Criterios), AHP, Juez1, Nivel de decisión ND1.

	C1	**C2**	**C3**
C1	1	1/3	1
C2	3	1	5
C3	1	1/5	1

CR: 3%

Tabla 25. Matriz de comparación pareada (Criterios), AHP, Juez 2, Nivel de decisión ND1.

	C1	**C2**	**C3**
C1	1	1/5	3
C2	5	1	7
C3	1/3	1/7	1

CR: 6.8%

Tabla 26. Matriz de comparación pareada Agregada, AIJ, Nivel de decisión ND1.

	C1	**C2**	**C3**	**Ponderación**
C1	1	0.258	2	0.188
C2	4	1	6	0.698
C3	1	0.169	1	0.113

Elección del método multicriterio para la valoración de alternativas:

Dado que la matriz de decisión contiene evaluaciones cualitativas se hará uso de ella como información de referencia, no existe realimentación entre las variables y no se contará con acceso a software especializado.

El método AHP cumple con los requisitos estipulados. Dado que algunas de las evaluaciones de la matriz de decisión son de carácter continuo, se descarta la aplicación del método ZAPROS.

Tabla 27. Matriz de comparación pareada (Alternativas), AHP, Criterio 1, Nivel de decisión ND 1.

	A11	**A12**	**Prioridad**
A11	1	1/6	0,143
A12	6	1	0,857

CR: 0%

Tabla 28. Matriz de comparación pareada (Alternativas), AHP, Criterio 2, Nivel de decisión ND 1.

	A11	**A12**	**Prioridad**
A11	1	1/3	0,25
A12	3	1	0,75

CR: 0%

Tabla 29. Matriz de comparación pareada (Alternativas), AHP, Criterio 3, Nivel de decisión ND 1.

	A11	**A12**	**Prioridad**
A11	1	1/7	0,125
A12	7	1	0,875

CR: 0%

4. *Calculo de las preferencias individuales:*

Tabla 30. Preferencias Individuales, Nivel de decisión ND 1.

Alternativa	**Prioridad**
A11	0.216
A12	0.784

5. *Análisis de resultados y toma de la decisión del nivel.*

En este nivel se presenta la situación número 1 definida en el modelo: El impacto de las alternativas es acumulable y por consiguiente no se excluirá a ninguna de ellas.

Valoración del nivel de decisión ND 2.1:

La alternativa A212 se expresa como dos acciones concretas de solución A2121 y A2122.

NIVEL DE DECISIÓN ND 2.1

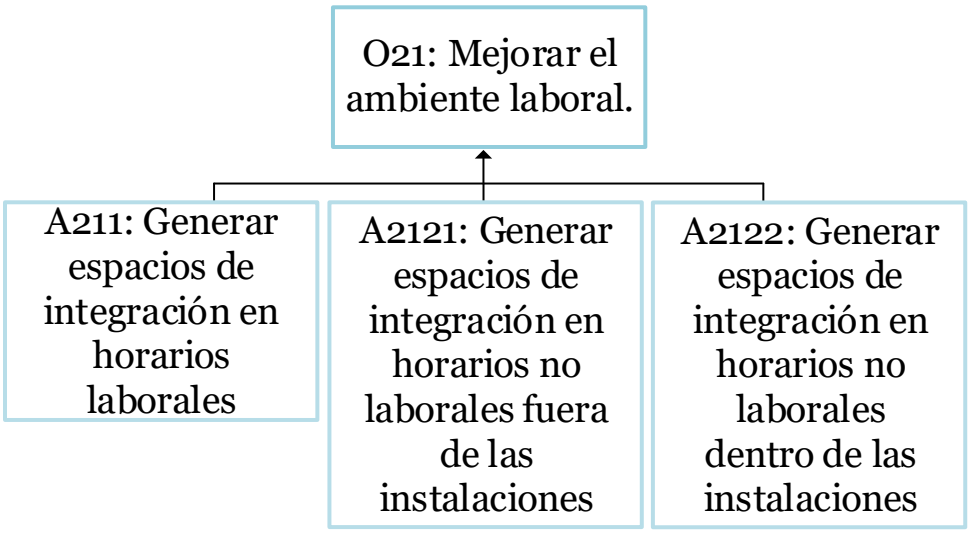


Figura 46. Nivel de decisión ND 2.1.

1. *Determinar los criterios de decisión:*

Criterio que mide el impacto (C1): Impacto en la mejora del ambiente laboral. medido como la reducción del número de quejas mensuales promedio de los trabajadores en porcentaje (%).

Criterios que miden los recursos (C2): Dinero incurrido por paros en la producción ($/mes). En miles de pesos.

(C3): Dinero incurrido para el pago de horas extras adicionales a los trabajadores ($/mes) en miles de pesos. En miles de pesos.

(C4): Dinero invertido ($/mes). En miles de pesos.

2. *Creación de la matriz de decisión:*

Tabla 31. Matriz de decisión Nivel de decisión ND 2.1.

	C1	**C2**	**C3**	**C4**
A211	20%	2000	750	100
A2121	70%	0	0	3000
A2122	10%	0	0	500

3. *Elección del método(s) multicriterio:*

Elección del método multicriterio para la ponderación de criterios:

Se cuenta con un juez para llevar a cabo la ponderación de los criterios (director general). El director general busca dar un juicio subjetivo para luego agregarlo a una ponderación objetiva.

Se selecciona al método de ordenación simple debido a que su aplicación es rápida y sencilla, y al método CRITIC para llevar a cabo una ponderación compromiso, debido a la existencia de evaluaciones con valores iguales a 0 en la matriz de decisión.

Tabla 32. Ponderación de criterios, Método Ordenación Simple, Nivel de decisión ND 2.1.

Ordenación simple		
Criterio	**Puntaje**	**Ponderación**
C1	1	0.1
C4	2	0.2
C3	3	0.3
C2	4	0.4

Tabla 33. Ponderación de criterios, Método CRITIC, Nivel de decisión ND 2.1.

Método CRITIC		
Criterio	**Calificación**	**Ponderación**
C1	1.418	0.243
C4	1.059	0.182
C3	1.059	0.182
C2	2.288	0.393

Tabla 34. Ponderaciones compromiso, Nivel de decisión ND 2.1.

	C1	**C2**	**C3**	**C4**
	MAX	*MIN*	*MIN*	*MIN*
A211	20%	2000	750	100
A2121	70%	0	0	3000
A2122	10%	0	0	500
Ordenación Simple	0.1	0.4	0.3	0.2
CRITIC	0.243	0.182	0.182	0.393
Ponderación Compromiso	0.106	0.316	0.237	0.341

Elección del método multicriterio para la valoración de alternativas:

Debido a que la matriz de decisión contiene evaluaciones cuantitativas se hará uso de ella como información de entrada y se aceptarán las suposiciones de linealidad. Se elige el método SMART ya que satisface estas consideraciones.

Tabla 35. Valoración de alternativas, Método SMART, Nivel de decisión ND 2.1.

Alternativa	**Utilidad**
A211	33.357
A2121	68.405
A2122	85.068

4. *Calculo de las preferencias individuales:*

Tabla 36. Preferencias individuales, Nivel de decisión ND 2.1.

Alternativa	Prioridad
A211	0.179
A2121	0.366
A2122	0.455

5. *Análisis de resultados y toma de la decisión del nivel.*

En este nivel se presenta la situación número 2 definida en el modelo, el director general desea elegir únicamente una de las alternativas consideradas. Por consiguiente, la Alternativa A2122 tendrá una prioridad de 1 y será evaluada en el nivel superior ND 2.

Tabla 37. Preferencias individuales, alternativas seleccionadas, Nivel de decisión ND 2.1.

Alternativa	Prioridad
A211	0
A2121	0
A2122	1

Valoración de un *nuevo* nivel de decisión ND 2.2:

La alternativa A22: mejorar la remuneración, puede considerarse como un objetivo O12, debido a la existencia de múltiples alternativas de decisión asociadas, conformando un nuevo nivel de decisión ND 2.2:

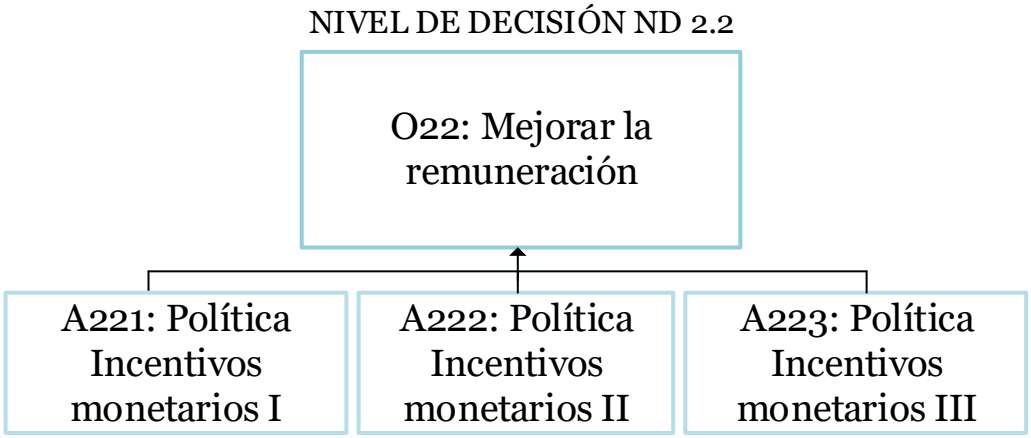


Figura 47. Nivel de decisión ND 2.2.

1. *Determinar los criterios de decisión:*

Criterio que mide el impacto (C1): Aumento promedio de la remuneración mensual de los trabajadores. medido en porcentaje (%).

Criterio que mide el recurso (C2): Dinero requerido para el sostenimiento de la alternativa. En miles de pesos ($/mes).

(c3): Cobertura. medida en número de trabajadores (trabajadores/mes).

2. *Creación de la matriz de decisión:*

Tabla 38. Matriz de decisión, Nivel de decisión ND 2.2.

	C1	**C2**	**C3**
A221	6	2000	30
A222	4	1500	40
A223	10	2500	20

Elección del método multicriterio para la ponderación de criterios:

Se elige al método Ordenación simple, por su rapidez y facilidad de aplicación. Como la matriz de decisión contiene únicamente evaluaciones expresadas como números determinísticos, se elige al método de Entropía para calcular una ponderación compromiso.

Tabla 39. Ponderación de Criterios, Ordenación Simple, Nivel de decisión ND 2.2.

Ordenación Simple		
Criterio	**Puntaje**	**Ponderación**
C1	1	0,1667
C2	3	0,5
C3	2	0,333

Tabla 40. Ponderación compromiso de criterios, nivel de decisión, ND 2.2.

Criterio	**C1**	**C2**	**C3**
Entropía	0,937	0,981	0,966
Diversidad	0,063	0,019	0,034
Ponderación Método ENTROPÍA	54%	16%	30%
Ponderación compromiso	0,332	0,304	0,364

Elección del método multicriterio para la valoración de alternativas:

Debido a que la matriz de decisión contiene evaluaciones cuantitativas, se hará uso de ella como información de entrada. No se aceptan suposiciones de linealidad. Se elige el método PROMETHEE II.

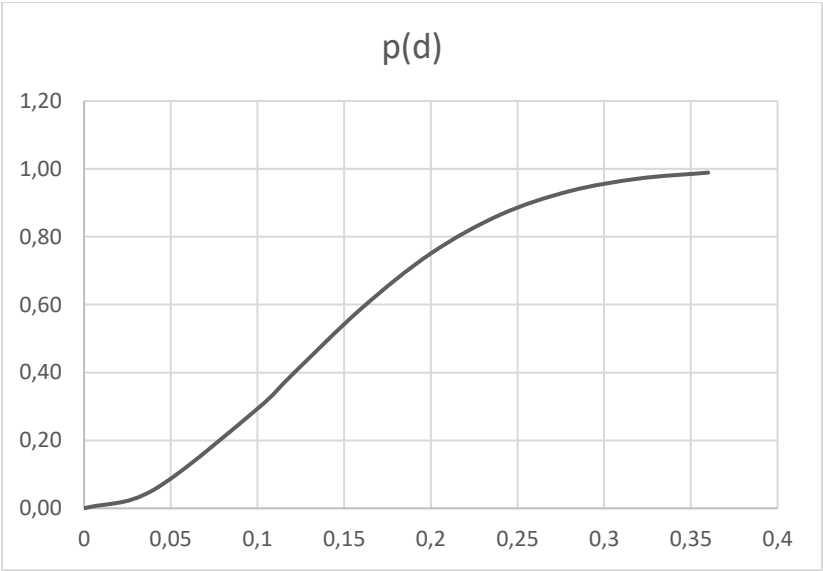


Figura 48. Criterio Generalizado, Tipo: Gaussiano, s=0,12, Nivel de decisión ND 2.2.

Tabla 41. Comparación pareada, A221-A222, PROMETHEE II, Nivel de decisión ND 2.2.

Criterio	Peso		A221	A222	d		π (a, b)	π(va)
C1	0,332	*Max*	0,300	0,200	0,1	**P (a, b)**	0,293	
C2	0,304	*Min*	0,333	0,250	0,083	**P (b, a)**		0,214
C3	0,364	*Max*	0,333	0,444	-0,111	**P (b, a)**		0,349
						∑	**0,293**	**0,563**

Tabla 42. Comparación pareada, A221-A223, PROMETHEE II, Nivel de decisión ND 2.2.

Criterio	Peso		A221	A223	d		π (a, b)	π (b, a)
C1	0,332	*Max*	0,300	0,002	0,298	**P (a, b)**	0,955	
C2	0,304	*Min*	0,333	0,417	-0,083	**P (a, b)**	0,214	
C3	0,364	*Max*	0,333	0,222	0,111	**P (a, b)**	0,349	
						∑	**1,517**	**0**

Tabla 43. Comparación pareada, A222-A223, PROMETHEE II, Nivel de decisión ND 2.2.

Criterio	Peso		A222	A223	d		π (a, b)	π (b, a)
C1	0,332	*Max*	0,200	0,002	0,198	**P (a, b)**	0,745	
C2	0,304	*Min*	0,250	0,417	-0,167	**P (a, b)**	0,619	
C3	0,364	*Max*	0,444	0,222	0,222	**P (a, b)**	0,820	
						∑	**2,184**	**0**

Tabla 44. Resultados, PROMETHEE II, Nivel de decisión ND 2.2.

	π (a, b)			
	A221	**A222**	**A223**	**ϕ+(a)**
A221	-	*0,293*	*1,517*	**1,811**
A222	*0,563*	-	*2,184*	**2,747**
A223	*0*	*0*	-	**0**
ϕ-(a)	**0,563**	**0,293**	**3,701**	
ϕ(a)	**1,248**	**2,453**	**-3,701**	

3. *Calculo de las preferencias individuales:*

Tabla 45. Preferencias Individuales, Nivel de decisión ND 2.2.

	ϕ(a)	**Prioridad**
A221	1,248	0,446
A222	2,453	0,554
A223	-3,701	0

4. *Análisis de resultados y toma de la decisión del nivel.*

Para este nivel se presenta la situación número 2 definida en el modelo, se elige a la alternativa con la mayor prioridad (A222), esta alternativa recibirá una ponderación de 1.

Valoración del nivel de decisión ND 2:

Como se observó en la valoración del nivel anterior, la alternativa de decisión A21 será representada en su totalidad por la acción A2122.

NIVEL DE DECISIÓN ND 2

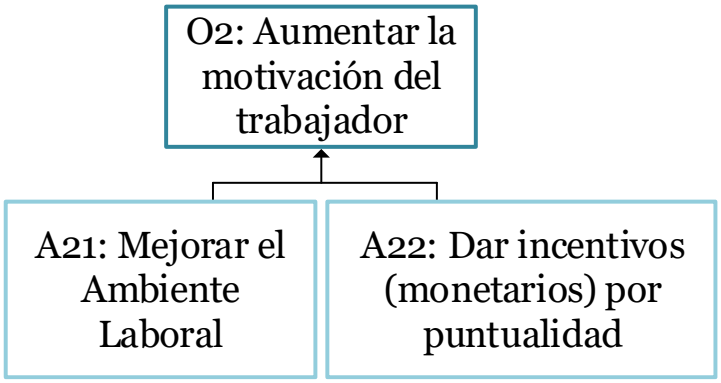


Figura 49. Nivel de Decisión ND 2.

1. *Determinar los criterios de decisión:*

Criterio que mide el impacto (C1): Impacto esperado en la mejora de la motivación de los trabajadores. medido a través de variables lingüísticas: muy bajo, bajo, medio, alto, muy alto.

Criterio que mide el recurso (C2): Dinero requerido para el sostenimiento de la alternativa ($/mes). En miles de pesos y expresados como un intervalo que muestra el rango esperado de los posibles valores.

(C3): Estabilidad del impacto generado en los trabajadores a lo largo del mes, medido a través de variables lingüísticas: muy bajo, bajo, medio, alto, muy alto.

2. *Creación de la matriz de decisión:*

Tabla 46. Matriz de decisión, Nivel de decisión ND 2.

	C1	**C2**	**C3**
A2122	Bajo-Medio	(500,500)	Medio
A22	Muy Alto	(1500,2000)	Alto

Como se puedo observar en el nivel anterior ND 2.1, el dinero invertido en miles de pesos mensuales, para la alternativa A2122, es de 500. Para hacer comparable este valor con los incurridos por la alternativa A22 en el ND 2, es necesario expresar esta cantidad como un intervalo.

Se utilizará la siguiente escala para transferir las variables lingüísticas a números triangulares difusos:

Tabla 47. Escala de transferencia de variables lingüísticas a números triangulares difusos, Nivel de Decisión ND 2.

Variable Lingüística	**Número triangular Difuso Asociado**
Muy Alto	(0.9,1,1)
Alto	(0.7,0.9,1)
Medio	(0.3,0.5,0.7)
Bajo	(0.1,0.3,0.5)
Muy Bajo	(0.1,0.1,0.3)

Se reemplazan las variables lingüísticas por cada uno de los números triangulares difusos asociados, en la matriz de decisión:

Tabla 48. Matriz de Decisión ND 2, NTD.

	C1	**C2**	**C3**
A2122	(0.1,0.4,0.7)	(500,500)	(0.3,0.5,0.7)
A22	(0.9,1,1)	(1500,2000)	(0.7,0.9,1)

3. *Elección del método(s) multicriterio:*

Elección del método multicriterio para la ponderación de criterios:

Se cuenta con un juez para llevar a cabo la ponderación de los criterios (director general).

El director general desea utilizar un método que le brinde confiabilidad en la toma de la decisión. Debido a que los datos no son determinísticos, no es posible llevar a cabo la ponderación por medio de los métodos CRITIC Y ENTROPÍA. Por consiguiente, se elige al método AHP para la ponderación de los criterios.

Tabla 49. Matriz de comparación pareada (Criterios), AHP, Nivel de decisión ND 2.

	C1	**C2**	**C3**	**Ponderación**
C1	1	5	3	0.659
C2	1/5	1	1	0.156
C3	1/3	1	1	0.185

CR: 3%

Elección del método multicriterio para la valoración de alternativas:

Debido a que la matriz de decisión contiene evaluaciones cuantitativas se hará uso de ella como información de entrada, se acepta la linealidad entre las funciones de criterio y la utilidad de la decisión. Se utiliza el método VIKOR porque solo se requiere la definición de un parámetro (veto) que para este caso será neutro (0.5).

Tabla 50. Matriz de decisión, Método VIKOR, Nivel de decisión ND 2.

	MAX	*MIN*	*MAX*
	C1	**C2**	**C3**
A411	(0.1 , 0.4 , 0.7)	(500 , 500)	(0.3 , 0.54 , 0.7)
A412	(0.9 , 1 , 1)	(1500 , 2000)	(0.7 , 0.9 , 1)

Tabla 51. Matriz de decisión Normalizada, Método VIKOR, Nivel de decisión ND 2.

	C1	C2	C3
A2122	(0.1 , 0.4 , 0.7)	(1 , 1)	(0.3 , 0.54 , 0.7)
A22	(0.9 , 1 , 1)	(0.25 , 0.33)	(0.7 , 0.9 , 1)

Tabla 52. PIS y NIS, VIKOR, Nivel de decisión ND 2.

F+	(0.9 , 1 , 1)	(1 , 1)	(0.7 , 0.9 , 1)
F-	(0.1 , 0.4 , 0.7)	(0.25 , 0.33)	(0.3 , 0.54 , 0.7)

Tabla 53. Resultados, VIKOR, Nivel de decisión ND 2.

	Sj	Rj	Qj
A2122	0.156	0.156	0
A22	0.844	0.659	3.219

4. *Calculo de las preferencias individuales:*

Con base a los resultados obtenidos, se da una ponderación de 1 a la alternativa A22 y 0 a la alternativa A2122.

Tabla 54. Prioridades Individuales, Nivel de decisión ND 2.

	Prioridad
A2122	0
A22	1

5. *Análisis de resultados y toma de la decisión del nivel.*

Para este nivel se presenta la situación número 2 definida en el modelo, la alternativa A22 es elegida como la mejor.

Valoración nivel de decisión ND General:

1. *Determinar los criterios de decisión:*

Criterio que mide el impacto (C1): Impacto esperado en la disminución de los retrasos en las horas de llegada del personal. medido como la reducción promedio de los retrasos mensuales en las horas de llegada, en porcentaje (%).

Criterio que mide el recurso (C2): Dinero requerido para el sostenimiento de la alternativa ($/mes). En miles de pesos.

(C3): Perdurabilidad de la alternativa.

2. *Elección del método(s) multicriterio:*

Elección del método multicriterio para la ponderación de criterios y la valoración de alternativas:

Para la decisión final se hará uso del método MACBETH, dado que no se consideró la existencia de dependencia y realimentación, ni se aceptaron suposiciones de linealidad.

El método otorga los pesos a los criterios evaluados, a partir de las valoraciones llevadas a cabo en las comparaciones por pares entre alternativas de decisión y la matriz pareada de comparación entre criterios. Los resultados se muestran a continuación:

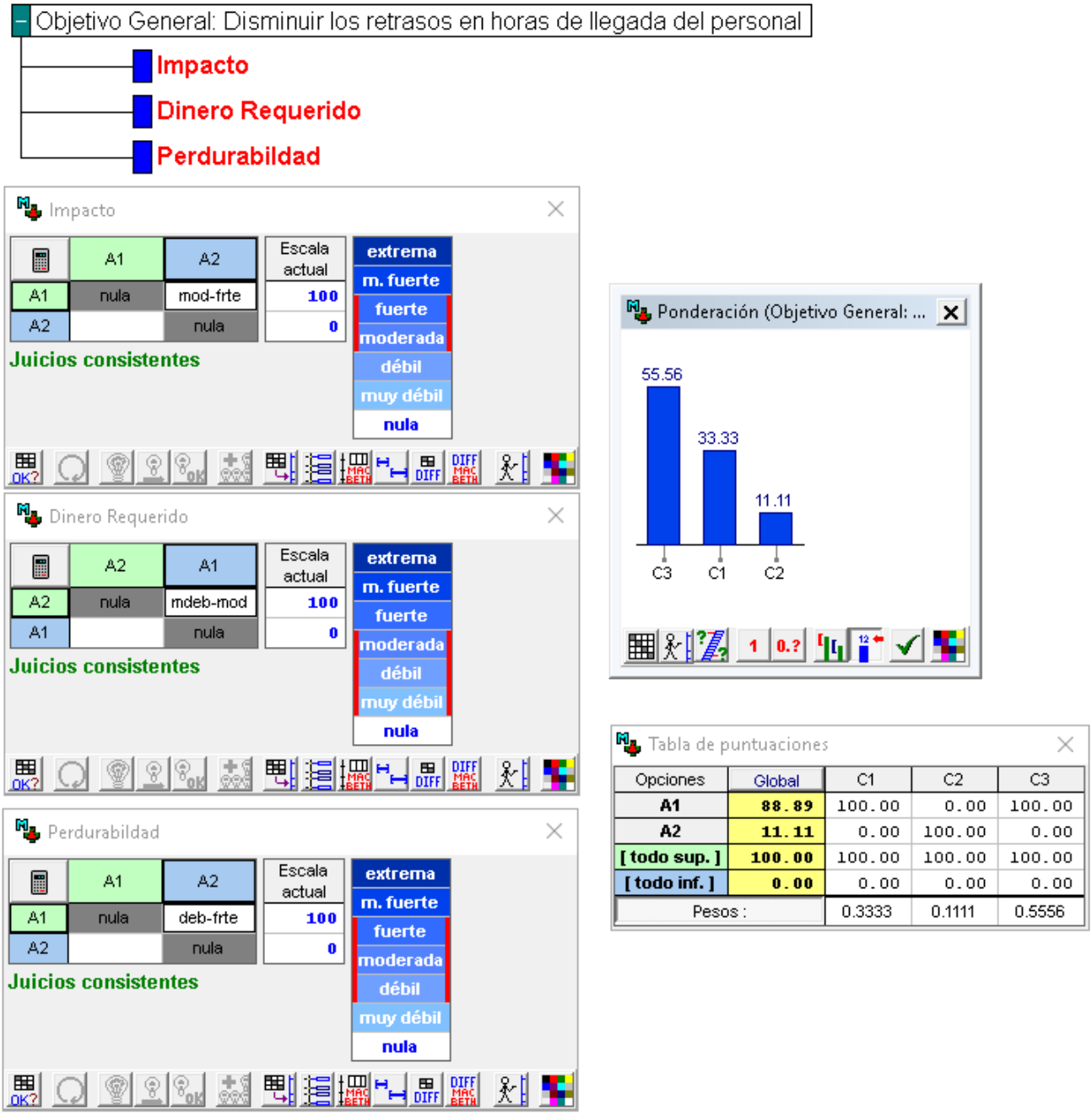


Figura 50. Resultados, Software M-MACBETH, Nivel de decisión General.

3. *Calculo de las preferencias individuales:*

Tabla 55. Prioridades Individuales, Nivel de decisión General.

	Puntaje Global Macbeth	Prioridad
A1	88,89	0,8889
A2	11,11	0,1111

Calculo de las Prioridades Globales:

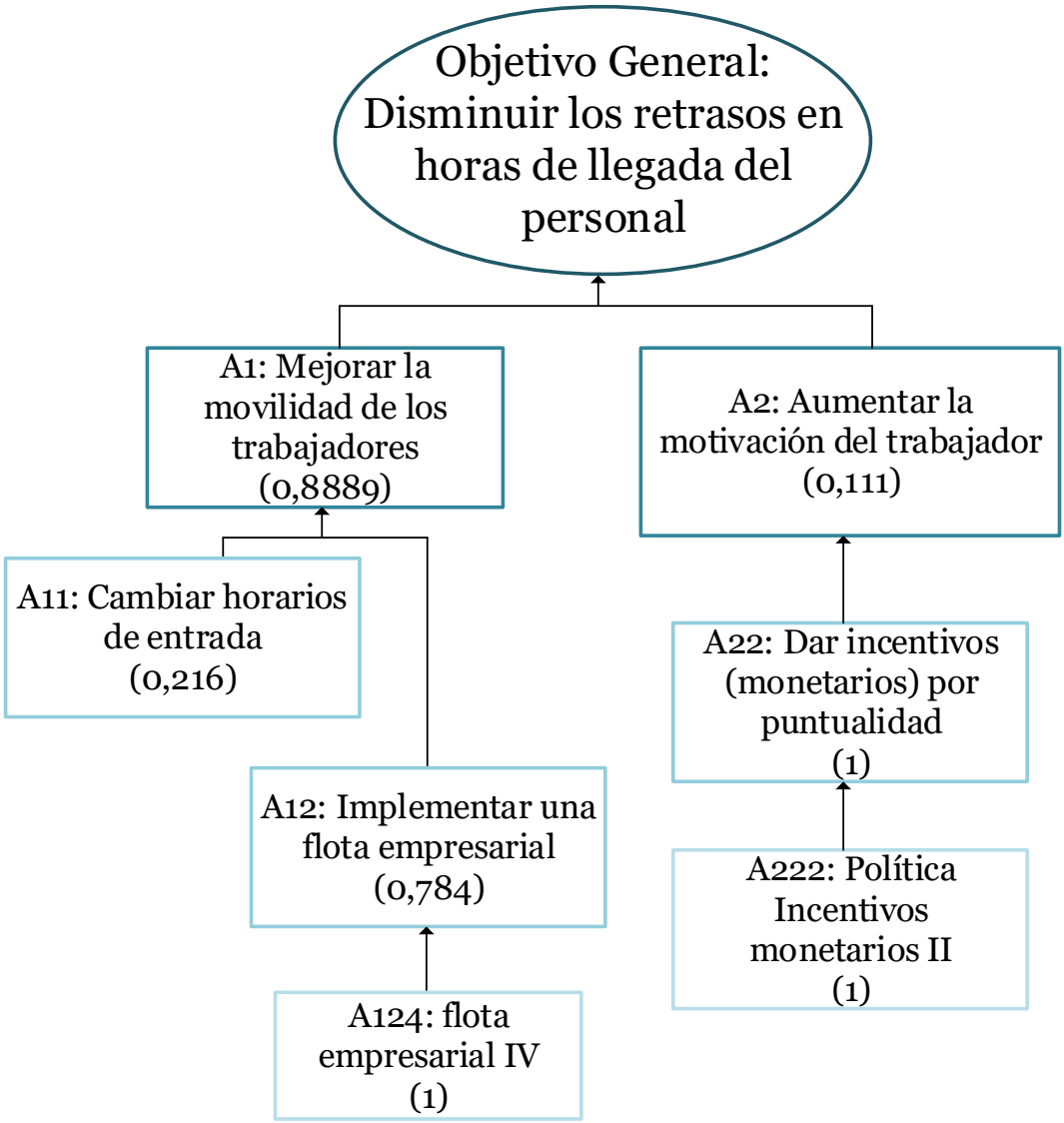


Figura 51. Prioridades Individuales, ejemplo ilustrativo.

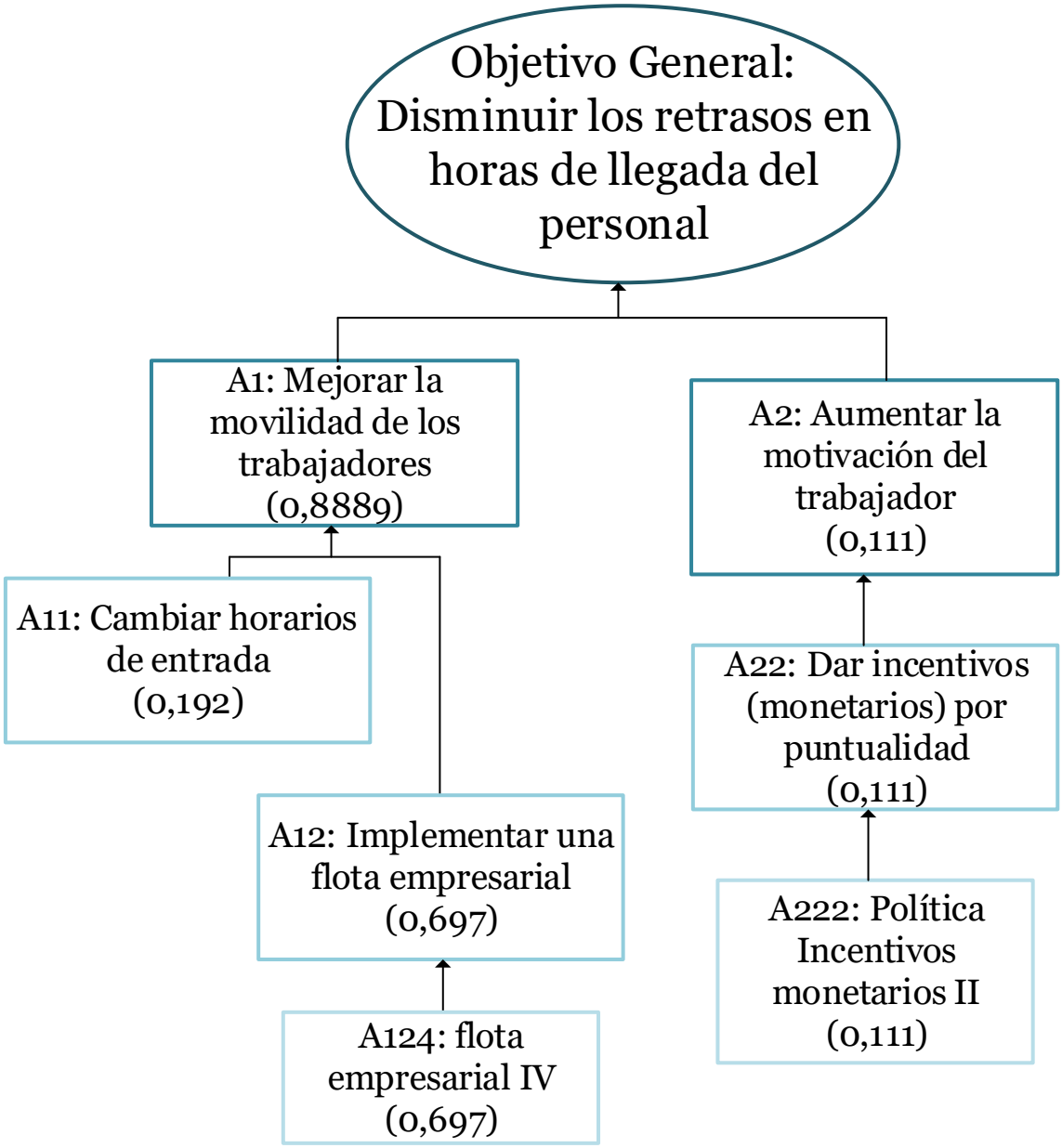


Figura 52. Prioridades Globales, ejemplo ilustrativo.

Conclusiones

- Se llevo a cabo la caracterización de los métodos multicriterio seleccionados, enfocada a la valoración de Diagramas Ishikawa. Aunque no fue posible definir una forma de determinar que método es mejor que otro, se establecieron parámetros cualitativos que limitan la aplicabilidad de los mismos y se describió la forma en que pueden ser utilizados en este tipo de valoración.

- El modelo propuesto integra de manera generalizada la aplicación de múltiples métodos representativos de la teoría de decisión multicriterio en la valoración de diagramas de Ishikawa, a través de un enfoque metodológico que brinda una guía para el abordaje de cualquier situación problémica que pueda representarse en este tipo de diagramas. Se elaboró un ejemplo que ilustra y demuestra la aplicabilidad del modelo.

- Las prioridades globales individuales obtenidas mediante la aplicación del modelo miden la preferencia del tomador de decisiones hacia cada posible curso de acción identificado, en virtud del impacto esperado frente a un problema, los recursos utilizados y cualquier criterio que sea considerado relevante. El tomador de decisiones puede elegir los cursos de acción a seguir en función a estas preferencias.

Recomendaciones para futuras investigaciones:

- Inclusión de un análisis de sensibilidad enfocado a la valoración de los diagramas de Ishikawa y herramientas o técnicas que permitan definir la factibilidad de un conjunto de alternativas de decisión dado.

- Ampliación de la gama de métodos considerados, incluyendo a aquellos pertenecientes a la misma familia de los métodos ya seleccionados.

Bibliografía.

Afful-Dadzie, E., Nabareseh, S., Oplatková, Z. K., & Klimek, P. (2016). Using fuzzy PROMETHEE to select countries for developmental aid. *Studies in Computational Intelligence*, *650*, 109–132. https://doi.org/10.1007/978-3-319-33386-1_6

Aguirre, D. A., Vela, A., Idalia Sánchez, R., & Delgado, R. K. (2017). Evaluación del diagrama de Ishikawa por medio del algoritmo difuso DEMATEL, (August).

Ahmad, M., & Hasan, M. (2016). Minimization of Rework in Food Industry by applying Pareto Chart and Cause-Effect Diagram, (February 2016).

Aydin, O., Shaygan, A., & Dasdemir, E. (2014). A Cause and Effect Diagram and Ahp Based Methodology for Selection of Quality Improvement Projects, (September), 21–25.

Aznar, J., & Guijarro, F. (2012). *Nuevos métodos de valoración: modelos multicriterio*. Editorial Universitat Politècnica de València.

Baker, D., Bridges, D., Hunter, R., Johnson, G., Krupa, J., Murphy, J., & Sorenson, K. (2001). Guidebook To Decision-Making Methods, (December 2001).

Bana, C. A., Corte, J. De, & Vansnick, J. (2003). MACBETH, 0–40.

Bana e Costa, C. A., De Corte, J.-M., & Vansnick, J.-C. (2004). On the Mathematical Foundations of MACBETH. https://doi.org/10.1143/PTPS.115.351

Bana e Costa, C. A., De Corte, J.-M., & Vansnick, J.-C. (2011). MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique). *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, 4–10. https://doi.org/10.1002/9780470400531.eorms0970

Bana e Costa, C. A., & Vansnick, J.-C. (1995). Uma nova abordagem ao problema da construção de uma função de valor cardinal: Macbeth. *Investigação Operacional*, *15*(Junho), 15–35.

Bazzazi, A., Osanloo, M., & Karimi, B. (2011). Deriving preference order of open pit mines equipment through MADM methods: Application of modified VIKOR

method. *Expert Systems with Applications*, *38*(3), 2550–2556. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.08.043

Brans, J.-P., & Mareschal, B. (2005). *MULTIPLE CRITERIA DECISION ANALYSIS*. https://doi.org/10.1007/0-387-23081-5

Ceballos, B., Lamata, M. T., & Pelta, D. A. (2016). A comparative analysis of multi-criteria decision-making methods. *Progress in Artificial Intelligence*, *5*(4), 315–322. https://doi.org/10.1007/s13748-016-0093-1

Ciocoiu, I. G., Ilie, G., & Ciocoiu, C. N. (2010). Application of Fishbone Diagram To Determine the Risk of an Event With Multiple Causes. *Management Research and Practice*, *2*(1), 1–20.

Coccia, M. (2017). The Fishbone diagram to identify, systematize and analyze the sources of general purpose technologies. https://doi.org/10.1453/jsas.v4i4.1518

Da silva, H., Pererira, J., Cunto, G., & Figueiredo. (2016). Use of Quality Tools for Problem Analysis (FMEA and Ishikawa Diagram) in a Small Textile Business. *Journal of Textile Science & Engineering*, *6*(3). https://doi.org/10.4172/2165-8064.1000258

Dias, L., & Mousseau, V. (2016). Elicitation - The Science and Art of Structuring Judgement. https://doi.org/10.1007/978-3-319-65052-4

Dodgson, J. S., Spackman, M., Pearman, A., & Phillips, L. D. (2009). *Multi-criteria analysis : a manual*. *Appraisal* (Vol. 11). https://doi.org/10.1002/mcda.399

Domingos, M., Carvalho, A., Zilli, J. C., & Monteiro, C. (2015). Diagrama de Causa-Efeito de Ishikawa : Estudo do Fluxo logístico em um Comércio de Materiais de Construção, (December). https://doi.org/10.18226/35353535.v4.2015.96

Dong, Q., & Saaty, T. L. (2014). An analytic hierarchy process model of group consensus. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, *23*(3), 362–374. https://doi.org/10.1007/s11518-014-5247-8

Edwards, W. (1977). How to use multiattribute utility measurement for social decision making. IEEE Transactions on Systems, Man, & Cybernetics.

Falatoonitoosi, E., Leman, Z., Sorooshian, S., & Salimi, M. (2013). Decision-making trial and evaluation laboratory. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, *5*(13), 3476–3480.

Figueira, J., Mousseau, V., & Roy, B. (2005). *ELECTRE METHODS. Multiple Criteria Decision Analysis*. https://doi.org/10.1007/0-387-23081-5

Fülöp, J. (2005). Introduction to Decision Making Methods. *Operations Research*, 1–15. https://doi.org/10.1.1.86.6292

García, J. L., & Meneses, L. C. (2000). Decisiones multicriterio : un enfoque alternativo al método MACBETH, 1–18.

García, M. D. S. (2009). Métodos para la comparación de alternativas mediante un Sistema de Ayuda a la Decisión (S.A.D.) y "Soft Computing." *Departamento de Electrónica, Tecnología de Computadoras y Proyectos*, *Tesis Doct*, 246.

Genaro, D. M., Ortega, A., & Pappa, M. (2011). Utilização Do Ciclo Pdca Associado Ao Diagrama De Ishikawa Como Ferramentas De Gestão De Uma Organizaçao Não Governamental, (March).

Gironés, X., Madrid, D., & Valls, A. (2008). Comparación de Dos Métodos de Toma de Decisiones Multicriterio: MACBETH y PROMETHÉE.

Gomes, D., Crespo, L., Carvalho, R., Monteiro, H., & Gomes, H. (2013). UMA AVALIAÇÃO INTEGRADA COM O CEQ , ISHIKAWA E AHP EM UMA EMPRESA DE CONCRETAGEM, (December). https://doi.org/10.12957/cadest.2013.15769

Górny, A. (2018). Identification of occupational accident causes by use the Ishikawa diagram and Pareto principles Identification of occupational accident causes by use the Ishikawa diagram and Pareto principles, (October 2017).

Grajales Quintero, A., Serrano Moya, E. D., & Hahn Von-H, C. M. (2013). Los métodos y procesos multicriterio para la evaluación. *Revista Luna Azul*, (36), 285–306. https://doi.org/10.17151/luaz.2015.40.14

Guarini, M. R. (2018). A Methodology for the Selection of Multi-Criteria Decision Analysis Methods in Real Estate and Land Management Processes. https://doi.org/10.3390/su10020507

Hoła, B., Nowobilski, T., Szer, I., & Szer, J. (2017). Identification of factors affecting the accident rate in the construction industry. *Procedia Engineering*, *208*, 35–42. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.018

Hossen, J., Ahmad, N., & Ali, S. M. (2017). An application of Pareto analysis and cause-and-effect diagram (CED) to examine stoppage losses: a textile case from Bangladesh. *Journal of the Textile Institute*, *108*(11), 2013–2020. https://doi.org/10.1080/00405000.2017.1308786

Ishikava, K. (1976). Guide to Quality Control.

Larichev, O. (2001a). Method ZAPROS for Multicriteria Alternatives Ranking and the Problem of Incomparability. *Informatica*, *12*(1), 89–100. Retrieved from http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0347768214&partnerID=tZOtx3y1

Larichev, O. (2001b). Ranking multicriteria alternatives: The method ZAPROS III. *European Journal of Operational Research*, *131*(3), 550–558. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00096-5

Linares, P., & Romero, C. (2002). Aggregation of preferences in an environmental economics context: A goal-programming approach. *Omega*, *30*(2), 89–95. https://doi.org/10.1016/S0305-0483(01)00059-7

Lira, L. H., Hirai, F. E., Oliveira, M., Portellinha, W., & Nakano, E. M. (2017). Use of the Ishikawa diagram in a case-control analysis to assess the causes of a diffuse lamellar keratitis outbreak. *Arquivos Brasileiros de Oftalmologia*, *80*(5), 281–284. https://doi.org/10.5935/0004-2749.20170069

Luicen Mayster, Jacques Pictet, Jean Simos (1994). Méthodes multicritères ELECTRE : description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale.

Malinowska, E. (2010). Using the Concept of the Weighted Ishikawa Diagram for Defining the Impact of Catering Enterprises on the Environment, *2*(5).

Monat, J. (2012). Enhanced Risk Assessment Matrix for the Management of Project Risks. *PMI Virtual Library*, 1–9.

Monteiro, H., & Gomes, H. (2009). Tomada De Decisão No Masp: Uma Contribuição Para Decisões Utilizando a Matriz AHP.

Monteiro, H., & Gomes, H. (2011). HIERARQUIZAÇÃO DE PROBLEMA NO MASP : A INTEGRAÇÃO ENTRE O DIAGRAMA CAUSA-E- EFEITO E O MÉTODO AHP, (June 2014).

Morillas, A. (2006). Introducción al análisis de datos difusos. *Departamento de Estadística y Econometría, Universidad de Málaga*, 1–62. Retrieved from http://webpersonal.uma.es/~MORILLAS/DATOSDIFUSOS.pdf

Munda, G. (1997). Teoría de Evaluación Multicroterio: Una Breve Perspectiva General, 1–30.

Munda, G. (2004). Métodos y Procesos Multicriterio para la Evaluación Social de las Políticas Públicas. *Revibec: Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, *1*(0), 31–45. https://doi.org/13902776

Nadaban, S., Dzitac, S., & Dzitac, I. (2016). Fuzzy TOPSIS: A General View. *Procedia Computer Science*, *91*(Itqm), 823–831. https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.07.088

Opricovic, S., & Tzeng, G. H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, *156*(2), 445–455. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1

Opricovic, S., & Tzeng, G. H. (2007). Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. *European Journal of Operational Research*, *178*(2), 514–529. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.01.020

Pacheco, J. F., & Contreras, E. (2008). *Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos*. *Publicación de las Naciones Unidas*.

https://doi.org/978-92-1-323231-6

Reina, D. (2008). Fundamentos de Matemática Difusa. *Fundación Universitaria Konrad Lorenz, Facultad de Matemáticas*, 1–69. Retrieved from http://www.konradlorenz.edu.co/images/stories/suma_digital_matematicas/EDICION_09_0I/trabajo_de_grado_daniel_reina.pdf

Reyna, S., & Cardells, F. (1999). Valoración AHP de los ecosistemas naturales de la Comunidad Valenciana. *Revista Valenciana d'Estudis Autonòmics*, (27), 153–177.

Romero, C. (1996). *Análisis de las decisiones multicriterio*.

Saaty, T., & Daji, E. (2014). When is a Decision Making Method Trustworthy? Criteria for Evaluating Multi-criteria Decision Making Methods.

Saaty, T. L. (1999). Fundamentals of the Analytic Network Process.

Saaty, T. L. (2004a). – Dependence and Feedback in Decision-Making With a Single Network, *13*(2), 129–157.

Saaty, T. L. (2004b). Decision making — the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, *13*(1), 1–35. https://doi.org/10.1007/s11518-006-0151-5

Saaty, T. L. (2004c). Fundamentals of the analytic network process — multiple networks with benefits, costs, opportunities and risks. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, *13*(3), 348–379. https://doi.org/10.1007/s11518-006-0171-1

Saaty, T. L., & Özdemir, M. S. (2014). How Many Judges Should There Be in a Group ? *Annals of Data Science*, *1*(3–4), 359–368. https://doi.org/10.1007/s40745-014-0026-4

Shaygan, A. (2016). A cause and effect diagram and FAHP based methodology for the selection of quality improvement projects in healthcare, 181–190.

Sun, C., Xiang, Y., Jiang, S., & Che, Q. (2015). A supply chain risk evaluation method based on fuzzy topsis. *International Journal of Safety and Security Engineering*, *5*(2), 150–161. https://doi.org/10.2495/SDP-V5-N2-150-161

Tamanini, I., & Pinheiro, P. R. (2011). Reducing incomparability in multicriteria decision analysis: an extension of the ZAPROS method. *Pesquisa Operacional*, *31*(2), 251–270. https://doi.org/10.1590/S0101-74382011000200004

Wayne L. Winston (2004). Investigación de operaciones aplicaciones y algoritmos

Yazdani, A. A., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2012). Integration of the fish bone diagram, brainstorming, and AHP method for problem solving and decision making-a case study. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *63*(5–8), 651–657. https://doi.org/10.1007/s00170-012-3916-7

Young, J. L., Ting, Y. L., & Ching, L. H. (1992). TOPSIS for MODM, *76*, 486–500.

Yue, Z. (2011). A method for group decision-making based on determining weights of decision makers using TOPSIS. *Applied Mathematical Modelling*, *35*(4), 1926–1936. https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.11.001

Zavadskas, E. K., Govindan, K., Antucheviciene, J., & Turskis, Z. (2016). Hybrid multiple criteria decision-making methods: A review of applications for sustainability issues. *Economic Research-Ekonomska Istrazivanja*, *29*(1), 857–887. https://doi.org/10.1080/1331677X.2016.1237302