

APLICACIÓN DEL PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO (AHP) PARA LAS SELECCION DE MEDIOS DE TRANSPORTE CON ENERGIA RENOVABLE BASADOS EN LOS FACTORES SOCIOECONÓMICOS, LEGALES Y AMBIENTALES EN LA CIUDAD DE BOGOTA

Rojas F, Mónica del Pilar, Herrera C, Jorge Aurelio

Universidad Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Ingeniería, Bogotá Colombia.
Maestría en Ingeniería de la Gestión

Resumen:

En este trabajo se presenta una metodología jerárquica de dos niveles para la selección del medio de transporte más amigable con el ambiente y más eficientes para el usuario de Transportes con Energías Renovables (TER) considerando aspectos técnicos/tecnológicos, políticos/legales, ambientales económicos, sociales y ambientales. La metodología propuesta aplica el Procesos Analítico Jerárquico (AHP) para la selección del mejor vehículo de energía o de combustión interna, mediante dos fases: un proceso de obtención de la información y una implementación AHP para problemas de toma de decisiones. Bajo esta metodología los aspectos técnicos/tecnológicos se consideran parámetros cuantitativos, mientras que los demás aspectos dependen en gran medida de los criterios identificados por los expertos.

Para validar el modelo, se considerarán varios escenarios: el real, el ideal y el alcanzable, buscando así iniciativas o soluciones factibles, con la intervención no sólo de nuevas políticas, sino también de Innovación y Desarrollo, para el montaje de la infraestructura necesaria para llegar al estado ideal.

Palabras Claves: Decisión, Multicriterio, Proceso Analítico Jerárquico, alternativa, criterio, factores críticos, alternativas, vehículos eléctricos

1. Introducción

Uno de los mayores retos de hoy en día es lograr reemplazar el uso de los combustibles fósiles en energía renovable, la implementación de las energías renovables debe estar ligada a una adecuada política de precios, la disponibilidad, la calidad de la energía y la calidad del suministro a largo plazo, fundamentalmente vinculada a los objetivos medioambientales y a la sensibilidad pública ante su forma de interacción con el entorno (García Gómez, 2010).

Pero de manera particular los desafíos tecnológicos planteados en el sector transporte requieren un análisis especial; partiendo desde la evaluación y la viabilidad siendo capaces de responder a los objetivos y a las necesidades económicas y productivas de un país (Figura 1).



Figura 1. Clases de vehículos de servicio particular año 2011. Fuente: Registro Distrital Automotor (RDA) - Concesión Servicios Integrales para la Movilidad (SIM)

Si bien no hay certeza sobre cuándo los recursos energéticos fósiles y minerales empezarán a escasear, si se conoce con claridad algunos factores que pueden motivar este agotamiento, por ejemplo, el incremento del consumo de gas y energía que se está dando como consecuencia de los elevados índices de crecimiento de las economías emergentes (Gómez 2008; La Caixa 2008). Puede pensarse que la obtención de energía no renovable a partir de estas fuentes resultará insostenible para las próximas generaciones, tanto por el agotamiento de los recursos como por su incidencia en el medioambiente. Incluso considerando la evolución que vienen mostrando las tecnologías de prospección, producción y recuperación del petróleo y el gas natural.

Por su parte, el mundo enfrenta hoy un crecimiento extraordinario de su población y de su demanda de energía; sólo el sector transporte consume alrededor de 2.500 millones de toneladas equivalentes de petróleo (MTEP), casi un tercio del consumo

final de energía, abastecido principalmente por derivados de petróleo (Tratadue & Carranza, 2014); aportando al alto índice de contaminación y riesgos para la salud pública.

Según datos de la Secretaría del Medio Ambiente, en su Informe de sostenibilidad, 2014 informa que Bogotá (y sus áreas aledañas), por ejemplo, consumen el 24 por ciento del total de la energía que consume Colombia; y por lo cual es la ciudad más contaminada del país y la tercera de América Latina (Secretaria del Medio Ambiente, 2014). Las fuentes móviles como carros, buses y motos generan el 60% de la contaminación del aire; mientras que el otro 40% lo generan las fuentes fijas, como empresas industriales tipo fábricas.

Con los anteriores antecedentes el estudio parte de lo que ocurre en la ciudad de Bogotá, donde el desarrollo urbano unido a la dificultad en la movilidad en la capital Colombiana han tenido un crecimiento. Esto se ha visto reflejado en el entorno ambiental y de transitabilidad de los ciudadanos, evidenciado en alguna medida por el desplazamiento de personas en su vehículo particular y unido a la dificultad en los medios masivos de transporte e inadecuados métodos alternativos de movilidad; generando graves problemas ambientales, sociales y económicos en las ciudades.

Por otra parte, la OMS (Organización Mundial de la Salud) en su estudio Ambient air Pollution database (2014), informa que Bogotá se encuentra en la lista de las cuarenta ciudades más contaminadas del mundo, y si el gobierno no toma medidas urgentes o no diseña formas novedosas para mejorar la movilidad, el futuro de la ciudad y la salud de los bogotanos pueden estar en riesgo.

La OMS espera que en 30 años la capital colombiana será como una gran nube de humo y congestión vehicular (Montezuma, 2009), pero otros estudiosos (Norregaard & Valerie, 2000) plantean que se pueden desarrollar ideas novedosas para evitar que esto ocurra dentro de las cuales algunas puede ser, volverse hacia los sistemas de transporte ecológico; bien sea el uso de vehículos eléctricos o híbridos y apoyado de otras estrategias de movilidad (bicicleta, a pie, uso de transporte público) o inclusive, empleando otros mecanismos de trabajo, que eviten el desplazamiento hasta el lugar de trabajo. Aunque se han venido realizando esfuerzos por mantener unos niveles controlables de la contaminación, según el estudio llevado a cabo por Gaitan, Cancino, & Beheretz 2007), el acelerado crecimiento económico de la capital, manifestado en mayor demanda de energía, así como un acelerado

consumo de combustible fósil, hacen que las medidas de control de la contaminación implementadas se hayan visto opacadas por el incremento en las emisiones que son el resultado indirecto del crecimiento económico.

El resto del documento se encuentra organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta el planteamiento del problema, seguido por la metodología propuesta en la sección 3. En la sección 4 se describe el caso de estudio, mientras que en la sección 5 se muestran los resultados, por último las conclusiones son presentadas en la sección 6.

2. Planteamiento del problema

El análisis entonces se enfoca en el impacto que tiene el uso de los diferentes tipos de vehículos frente a la movilidad y al medio ambiente en la capital Colombiana; según un estudio del Observatorio Ambiental sobre la contaminación en la ciudad de Bogotá, para el año 2016 Bogotá contaba con 2.103.725 vehículos de uso particular registrados (excluyendo las motocicletas, moto triciclos y vehículos de tracción animal), y de estos, 937.280 tiene antigüedades de modelo de más de 20 años (Observatorio Ambiental, 2016).

Este estudio hace un énfasis sobre el impacto que tienen los vehículos eléctricos en Bogotá, según datos del Distrito compilados en un estudio realizado por la empresa de energía -Codensa-, en Bogotá se presenta un fenómeno particular frente a la antigüedad de los automotores que se encuentran en circulación, existen alrededor de 600.000 vehículos particulares con una edad promedio de 14 años y 18.000 buses con un promedio de 12 años, lo que incide directamente sobre la afectación al medio ambiente y a la movilidad.

De todo lo anterior se puede inferir sobre las necesidades urgentes de: i) mejora de la eficiencia energética del transporte; ii) reducción de la dependencia energética de los derivados del petróleo; iii) reducción de los contaminantes del transporte en ámbitos urbanos y iv) mejorar la calidad de vida de los ciudadanos y la salud pública. Por lo cual el objetivo de este artículo es evidenciar los escenarios más viables para la implementación masiva del uso de los vehículos ecológicos o TBR, vista como una alternativa que contribuya a mejorar la sostenibilidad del transporte urbano, integrándose a una Estrategia de Movilidad Sostenible (ver Figura 2).

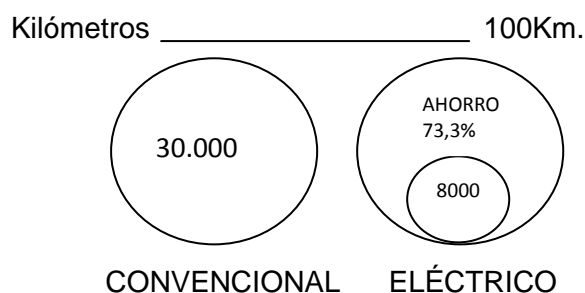


Figura 2. Comparación estimada tomando el litro de combustible a \$5.000

Fuente: Revista Movilicemos

En este contexto, un tipo de decisión, que contiene las características citadas en los párrafos anteriores, es la adecuada selección para sustituir los combustibles fósiles, que sea capaz de dar respuesta a las previsibles demandas del mercado en un determinado intervalo temporal.

Para contribuir a la solución de este problema, la presente investigación tiene por objetivo principal proponer un criterio que permita, a las organizaciones, identificar y priorizar, aplicando el método de decisión multicriterio denominado AHP (Saaty 2008). Considerando los factores críticos que inciden en la selección de un tipo de vehículo eléctrico de forma que éste sea la mejor respuesta, entre las alternativas que se analicen en ese momento, a las previsibles demandas del mercado.

La toma de decisiones multicriterio es un problema crítico de la vida real; cualquier actividad involucra de una u otra manera, la evaluación de un conjunto de alternativas en términos de un conjunto de criterios de decisión, donde muy frecuentemente estos criterios están en conflicto unos con otros.

Dentro de este marco, es vital contar con la información adecuada para tomar la mejor decisión, la cual se determinará dentro de un conjunto de posibles alternativas, las cuales deben ser evaluadas frente a múltiples criterios que se definan para este propósito.

De acuerdo con la metodología, se llevó a cabo una revisión bibliográfica y documental relacionada con los problemas de decisión y los principales métodos de decisión multicriterio (MDM), haciendo un especial énfasis en el Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

Además, Saaty (2008) nos refiere que hasta 2008 se han realizado centenares de

aplicaciones del AHP por parte de equipos de investigación y desarrollo pertenecientes a universidades, empresas y gobiernos, entre ellas podemos citar su uso por IBM para seleccionar su estrategia de mejora de la calidad para diseñar el sistema AS/400. En 2001 fue utilizado para seleccionar el mejor lugar para reedificar la ciudad turca de Adapazari destruida por un terremoto. British Airways lo usó en 1998 para seleccionar el sistema de entrenamiento para su flota de aviones. En 1987 se utilizó para seleccionar el mejor tipo de plataforma de extracción petrolera que sería necesario construir en el Atlántico Norte, y uno de los factores que tuvo un mayor peso fue el costo de su posterior desguace (como ocurre en el caso de los aerogeneradores, que su instalación y desinstalación son operaciones muy costosas). Xerox Corporation utilizó AHP, en 1999, para seleccionar sus proyectos de investigación de forma que se ajustaran al presupuesto disponible. En ese mismo año, Ford Motor Company también utilizó AHP para establecer las prioridades a la hora de lograr una mayor satisfacción del cliente con sus productos y servicios.

Más recientemente, también encontramos aplicaciones de AHP, sin integración con otras técnicas, para resolver problemas de selección de proveedores, materiales, tecnología y maquinaria, entre dichas aplicaciones, podemos mencionar: selección de proveedores para una empresa de construcción (Bayazit, 2006), selección de una tecnología de red de acceso inalámbrica (Martín y Moreno, 2007), selección de sistemas automáticos para edificios inteligentes (Wong, 2008), evaluación de alternativas tecnológicas y operativas para la recogida de aceite en la industria petrolera (Castillo, 2009), selección de sistemas de limpieza para motores (García, 2009), selección de materiales aislantes (Azizi, 2009), selección de paquetes de software (Jadhay, 2009), selección de plantas de energía solar (Aragonés, 2009) selección de tecnologías nucleares (Lee, 2010).

Muchas otras aplicaciones de AHP están relacionadas con : procesos de evaluación y selección de tecnología, proyectos de ingeniería y maquinaria, igualmente podemos encontrar esta metodología en: el campo de los negocios, la industria y el medio ambiente, identificación de tecnologías para la disposición de basura en condominios, programación óptima de sistemas de aire acondicionado, marco estratégico para la integración de ciencia y tecnología en el desarrollo de productos, selección de biotecnológicas para la agricultura, evaluación de compatibilidad de software en procesos industriales, evaluación de impacto ambiental, Selección de software, selección de materiales para la construcción, selección de maquinaria

industrial y selección de plantas de energía solar.

Por todos los motivos expuestos anteriormente, el proceso que elegimos para analizar y proponer una solución al problema de selección mediante métodos de decisión multicriterio es el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), ya que es un método discreto y ofrece ciertas ventajas respecto a otros procedimientos, como son: su simplicidad y claridad.

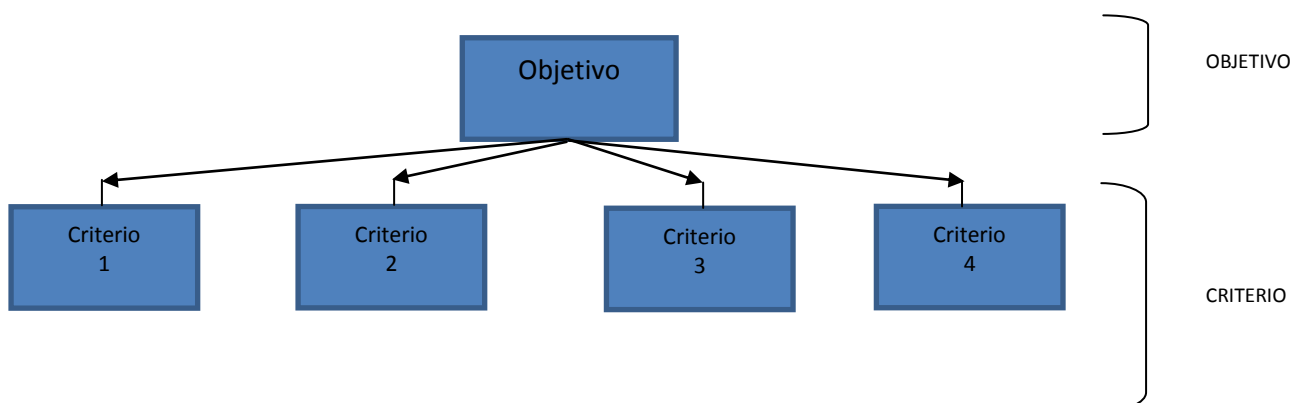
AHP es una sencilla, lógica y estructurada metodología de trabajo, basada en la descomposición del problema en una estructura jerárquica; el hecho de que este procedimiento permita adicionalmente realizar el análisis de sensibilidad, para observar y estudiar otras posibles soluciones al hacer cambios en la importancia (ponderación) de los elementos que definen el problema de decisión.

3. Metodología propuesta

La metodología se diseña para un caso en estudio, el cual requiere una técnica para la toma de decisiones, basada en realizar una distribución de las decisiones a tomar en función de una prioridad o jerarquía que ayuda a visualizar cuál o cuáles son las decisiones que mayor impactan frente al objetivo.

El uso de la metodología AHP, por sus siglas en inglés (Analytic Hierarchy Process), desarrollada por Thomas L Saaty en 1980 es un método basado en la formulación de una estructura jerárquica que se utiliza para tratar decisiones complejas; el método clasifica las opciones o soluciones a un problema dado, mediante una evaluación según diferentes criterios y bajo un sistema de ponderación definido. Los pesos se definen mediante una comparación por pares, simplificando el proceso de selección. En el método AHP, los problemas se modelan como jerarquías (ver Figura 3).

En muchos casos cada criterio se puede dividir en varios subcriterios para analizar más a fondo los detalles del problema estudiado. Las comparaciones por pares se usan para establecer la importancia del peso fijado para cada criterio.



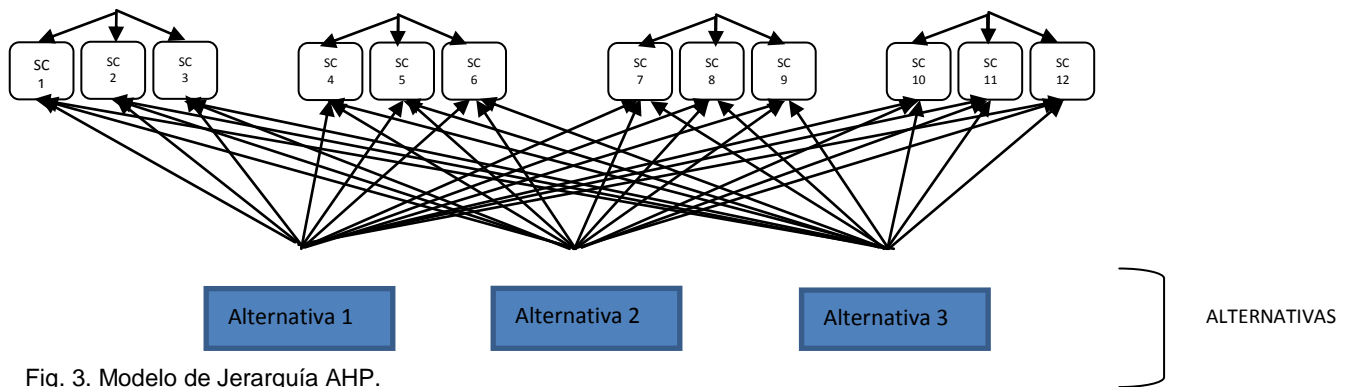


Fig. 3. Modelo de Jerarquía AHP.

Las comparaciones que se usan en estas escalas en cada nivel de análisis se usan para construir las matrices de comparación por pares, usando el procedimiento detallado en los pesos asociados a cada comparación.

La aplicación de la metodología en el desarrollo de esta artículo se divide en varias etapas: la primera consiste en determinar un objetivo o problema a resolver; después se requiere determinar los criterios bajo los cuales se va a basar la estructura de evaluación, estos deben ser claros y específicos; de estos criterios se debe obtener las diferentes y posibles alternativas, una vez que las alternativas son conocidas y los criterios han sido definidos se requiere definir la importancia relativa de cada criterio, esta calificación viene dada del concepto obtenido de los expertos, para este artículo, los expertos seleccionados hacen parte de sistemas de fabricación, distribución y comercialización de transporte vehicular.

Para la aplicación de encuestas se determinó la siguiente escala de Preferencias:

| Planteamiento verbal de la preferencia | Calificación |
|--|--------------|
| Extremadamente preferible | 9 |
| Muy fuertemente preferible | 7 |
| Fuertemente preferible | 5 |
| Moderadamente preferible | 3 |
| Igualmente, importancia | 1 |

Tabla 1. Clasificación de los criterios de Saaty 1980.

Como todo trabajo de investigación implica la recolección y el análisis de los datos derivados a través de la observación, la medición, las preguntas, o una combinación

de las anteriores estrategias. Los datos pueden ser numéricos, verbales, respuestas a cuestionarios o registros de observaciones o experimentos (Blaxter *et al.* 2005).

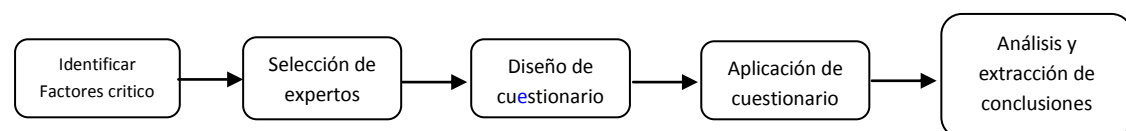
Cuando ya se obtienen las alternativas, el paso siguiente consistió en que a partir del estado actual, se re parametrizan los diferentes factores, buscando el estado ideal y el estado propuesto.

4. Caso de Estudio

El objetivo de la metodología es encontrar la mejor alternativa de decisión, con base en los factores inherentes en la toma de decisión para adquirir un vehículo eléctrico frente a un vehículo convencional, y como resultado la metodología es aplicable a 3 escenarios: escenario actual, escenario ideal y escenario propuesto.

El foco del proceso de toma de decisión y del modelo AHP propuesto consiste en la selección de la mejor alternativa para identificar la decisión más aplicable, que permita identificar, priorizar y determinar si la adopción de vehículos eléctricos es una nueva posibilidad viable y sostenible, bajo ciertas circunstancias.

Pero para llegar a lo propuesto anteriormente, fue necesario desarrollar la metodología en las siguientes etapas:



A continuación, se describen cada una de las etapas de la metodología:

1. Identificar factores críticos que intervienen en la selección de un vehículo diferente al de combustión tradicional (uso del petróleo): Para la identificación de factores críticos y la selección de los criterios, el estudio se basó en la identificación de las diferentes variables que impactan el momento decisivo de la adquisición de un vehículo automotor, teniendo los factores que inciden en la decisión. Los criterios o factores críticos identificados fueron:

✓ **CR1. Tecnológicos / Técnicos**

Este criterio hace referencia a los aspectos relacionados con le eficiencia y efectividad de los vehículos en análisis (eléctricos y de combustión tradicional). Los subcriterios identificados son:

- Autonomía: evalúa la capacidad de Kilómetros recorridos.

- Costos de Recargas/ tanqueo: evalúa el valor necesario para una recarga frente a un tanqueo.
- Costos de Mantenimiento: evalúa los costos de mantenimiento según las características por tipología de los vehículos.

✓ **CR2. Políticos/Legales**

Este criterio hace referencia a los factores relacionados con todas las leyes, políticas o tratados que el gobierno aplica a nivel de la movilidad y comercialización de vehículos. Los subcriterios identificados son:

- Amnistía arancelaria: Hace relación a los impuestos o gravámenes aplicables en la comercialización de vehículos.
- Excepción pico y placa: Es el privilegio dado a los conductores de vehículos que no usan combustibles fósiles.
- Disponibilidad de áreas de carga/tanqueo: Hace referencia a los espacios destinados para recargas o tanqueos, medidas por las unidades existentes por kilómetro.

✓ **CR3. Ambientales**

Este criterio hace referencia a los factores externos al individuo y capaces de influir en la experiencia. Los subcriterios identificados son:

- Emisiones contaminantes: Hace referencia al conjunto de sustancias que se vierten a la atmósfera, como el dióxido de carbono, el óxido de nitrógeno, el monóxido de carbono y el dióxido de sulfuro, específicamente las producidas por los vehículos.
- Eficiencia Energética: califica cual opción vehicular usa de manera eficiente el consumo de los recursos con los que cuentan.
- Impacto en ruido: Genera un análisis de la relación generada por la sensación acústica y las condiciones técnicas de cada vehículo

✓ **CR4. Socioeconómicos**

Este criterio hace relación a la percepción subjetiva sobre los factores que impactan el bolsillo y el relacionamiento de la sociedad. Los subcriterios identificados son:

- Precio de adquisición: valida las diferencias relativas con los costos de compra de los diferentes tipos de vehículos.
- Impacto en la movilidad: Identifica si según la tipología del vehículo, éste puede impactar positiva o negativamente a la transitabilidad en la capital

colombiana.

- Percepción de seguridad: refleja de manera subjetiva lo que los usuarios de vehículos perciben frente a la seguridad de cada tipología de vehículo.

2. Selección de expertos en tecnologías automotrices de vehículos eléctricos: Los expertos fueron elegidos bajo dos criterios, el primer grupo escogido fue el de los compradores frecuentes y potenciales de este sistema de transporte y el segundo grupo correspondió a los profesionales técnicos en el funcionamiento de los vehículos eléctricos. Ambos expertos permitieron integrar los conceptos de necesidad, funcionalidad y accesibilidad del vehículo; la encuesta desarrollada se llevó a cabo a unos entes idóneos (CESVI Colombia; Revista VEC-Movilidad Eléctrica y Sostenible y Automas- Centro de Diagnóstico Automotor); la calidad de los expertos influye decisivamente en la exactitud y confiabilidad de los resultados y en esto interviene no sólo la experiencia técnica, sino también los conocimientos específicos sobre los criterios a evaluar y las percepciones de otros expertos vivenciales.

3. Diseño de cuestionario: Se elaboró un documento, tipo encuesta (Anexo 1) para recopilar la opinión de los expertos en tecnologías automotrices de vehículos eléctricos y consumidores frecuentes.

Durante el desarrollo del trabajo, se seleccionaron los siguientes instrumentos para obtener los datos necesarios a fin de dar respuesta a las preguntas de investigación:

- Lista inicial de alternativas y variables explicativas que las caracterizan, esta se obtuvo a partir de la investigación bibliográfica y documental llevada a cabo.
- Validación de la lista, la cual se sometió a la validación de un experto que emitió su juicio mediante el informe correspondiente, el cual dio origen a una nueva lista de alternativas y variables que tenía en cuenta las aportaciones del validador.
- Diseño de un cuestionario inicial a fin de obtener los datos e información del panel de expertos. Dicho cuestionario incorpora la lista mencionada en el punto anterior.
- Cuestionario inicial nuevamente sometido a la validación de un experto que

emitió su juicio mediante el informe correspondiente, el cual dio origen a un cuestionario definitivo que tenía en cuenta las aportaciones del validador y que se aplicó al grupo de expertos en vehículos eléctricos.

- Se procedió a priorizar los factores críticos (criterios y subcriterios) y a establecer los rankings de prioridad utilizando la metodología propuesta por Saaty (1997).

Para facilitar los instrumentos mencionados a los validadores y al panel de expertos se utilizó el correo electrónico. El diseño de los cuestionarios se realizó de forma que resultase sencilla su cumplimentación por medios informáticos y que, al mismo tiempo resultase fácilmente aplicable al desarrollo del AHP.

4. Aplicar el cuestionario, analizar la información obtenida y priorizar los factores críticos y alternativas mediante el Proceso Analítico Jerárquico: Para los fines del presente estudio los expertos escogieron aquellos vehículos que funcionalmente y frente al usuario, prestan un servicio similar, unas funcionalidades homologables y unas características deseable en cuento a condiciones técnicas, eficiencia y diseño; los cuales fueron: Renault ZOE (eléctrico), BYD (eléctrico), Renault Sandero (combustión)

Con la evaluación y estudio de los criterios, se determinó la necesidad de decantar aún más el estudio, identificando subcriterios y así estructurando el problema de decisión como modelo jerárquico; para el estudio se consideraron dos (2) niveles jerárquicos, como se observa en la Figura 4.

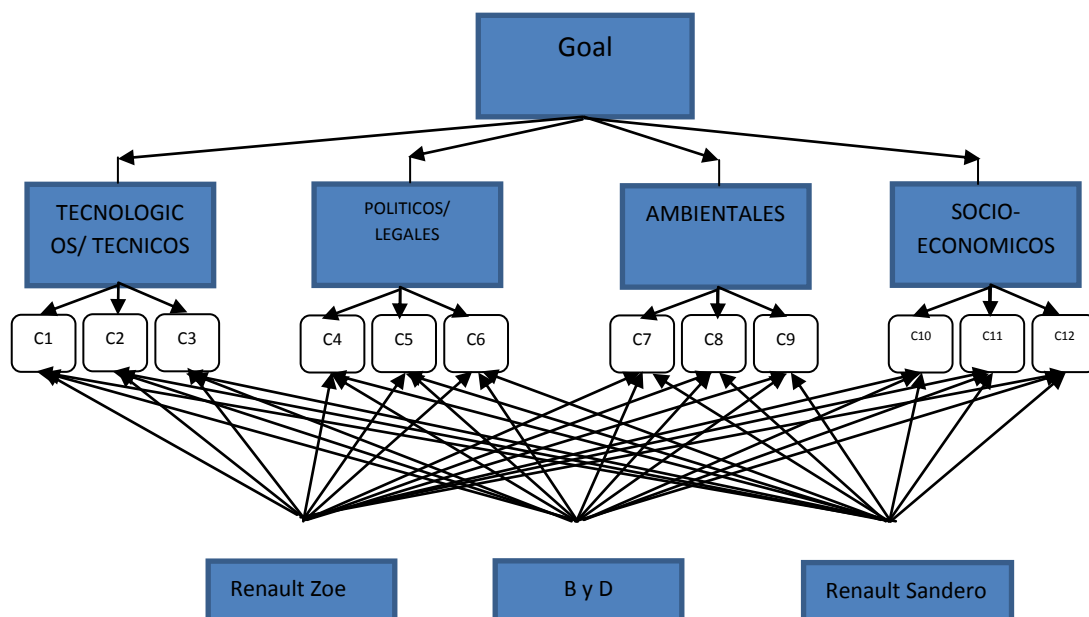


Figura 4. Modelo de Jerarquía planteado (Fuente propia)

Donde:

- C1: Autonomía (Km recorridos).
- C2: Costos de Recargas/ tanqueo.
- C3: Costos de Mantenimiento
- C4: Amnistía arancelaria
- C5: Excepción pico y placa
- C6: Disponibilidad de áreas de carga/tanqueo
- C7: Emisiones contaminantes
- C8: Eficiencia Energética
- C9: Impacto en ruido
- C10: Precio de adquisición
- C11: Impacto en la movilidad
- C12: Percepción de seguridad

5. Analizar datos y extraer las conclusiones: Una vez recogidas las valoraciones efectuadas por el grupo de expertos, mediante el cuestionario diseñado al efecto, se procedió al traslado de los datos en una hoja de cálculo.

Una vez agregados los juicios y con objeto de priorizar los factores críticos, (de acuerdo con lo establecido en el AHP), se construye para cada criterio la correspondiente matriz recíproca para la comparación pareada de juicios.

A partir de los vectores de prioridad obtenidos para cada criterio, se obtienen los pesos relativos locales y globales de todos los factores críticos, los cuales se evidencian en el Anexo No. 2. Matriz de pares para los diferentes escenarios de estudio.

Dado que las alternativas de solución al problema de investigación son evaluadas también por el grupo de expertos, se aplica a ellas el mismo proceso que acabamos de describir para los criterios, obteniendo un vector de alternativas priorizado.

Finalmente, de acuerdo con los resultados, se identifica en primera instancia el Escenario real, es decir el resultado que arroja el análisis bajo las condiciones actuales de los criterios:

5. Resultados

Después de aplicar la metodología, y basados en los criterios y subcriterios determinados en conjunto con los expertos, se logró obtener en un primer momento como:

❖ **Escenario real:** bajo este escenario la mejor opción sería el Renault Sandero (combustión tradicional) el cual sigue siendo más llamativo que los vehículos eléctricos de similares características, teniendo un fuerte peso en los subcriterios de

- Autonomía, frente a la capacidad de los kilómetros recorridos, frente a la de los vehículos eléctricos.
- Precio de adquisición: el Renault sandero, frente a las características presenta un precio mas accequibles frente al de los vehículos eléctrico.
- Percepción de seguridad: por las características del Renault Sandero, la percepción de seguridad tiene un peso superior al de los del vehículo eléctrico.

| Subcriterios | Valor de cada alternativa vs el criterio | | | Ponderación c/ subcriterio | Alternativas x peso de cada subcriterio | | |
|--|--|------|-----------------|----------------------------|---|-------|-----------------|
| | Renault ZOE | BYD | Renault Sandero | | Renault ZOE | BYD | Renault Sandero |
| Autonomia (Km recorridos) | 0,09 | 0,09 | 0,82 | 0,176 | 0,016 | 0,016 | 0,144 |
| Costos de Recargas/tanqueo | 0,45 | 0,45 | 0,09 | 0,084 | 0,038 | 0,038 | 0,008 |
| Costos de Mantenimiento | 0,49 | 0,43 | 0,08 | 0,046 | 0,023 | 0,020 | 0,004 |
| Amnistía | 0,47 | 0,47 | 0,07 | 0,045 | 0,021 | 0,021 | 0,003 |
| Excepción pico y placa | 0,47 | 0,47 | 0,05 | 0,212 | 0,101 | 0,101 | 0,011 |
| Disponibilidad de áreas de carga/tanqueo | 0,14 | 0,14 | 0,71 | 0,012 | 0,002 | 0,002 | 0,009 |
| Emisiones contaminantes | 0,45 | 0,45 | 0,09 | 0,033 | 0,015 | 0,015 | 0,003 |
| Eficiencia Energética | 0,43 | 0,43 | 0,14 | 0,019 | 0,008 | 0,008 | 0,003 |
| Impacto en ruido | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,006 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| Precio de adquisición | 0,07 | 0,14 | 0,79 | 0,261 | 0,018 | 0,037 | 0,206 |
| Impacto en la movilidad | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,052 | 0,017 | 0,017 | 0,017 |
| Percepción de seguridad | 0,20 | 0,20 | 0,60 | 0,052 | 0,010 | 0,010 | 0,031 |
| | | | | | 0,272 | 0,288 | 0,440 |

❖ **Escenario ideal:** Cuando el modelo es modificado y se optimizan los criterios abajo relacionados, la mejor opción debería ser el Renault ZOE (vehículo eléctrico),

pero para llegar a este escenario se requiere que los siguientes subcriterios sean ajustados:

- Disponibilidad de áreas de recarga: Ampliar las zonas de recarga, habilitando estructuras dentro de zonas de parqueaderos en oficinas.
- Autonomía (Km recorridos): este factor se verá impactado directamente con la ampliación de áreas de recarga, pues así este factor en los vehículos eléctricos estaría más cercano a los de la combustión
- Precio de Adquisición: Generar políticas para otorgar mayores aranceles en la importación de estos vehículos, de tal manera que los vehículos eléctricos sean más económicos.

| Subcriterios | Valor de cada alternativa vs el criterio | | | Ponderación C/ subcriterio | Alternativas multiplicadas por el peso de cada subcriterio | | |
|--|--|------|-----------------|-------------------------------|--|-------|-----------------|
| | Renault ZOE | BYD | Renault Sandero | | Renault ZOE | BYD | Renault Sandero |
| Autonomia (Km recorridos) | 0,25 | 0,25 | 0,50 | 0,176 | 0,044 | 0,044 | 0,088 |
| Costos de Recargas/ tanqueo | 0,45 | 0,45 | 0,09 | 0,084 | 0,038 | 0,038 | 0,008 |
| Costos de Mantenimiento | 0,49 | 0,43 | 0,08 | 0,046 | 0,023 | 0,020 | 0,004 |
| Amnistía arancelaria | 0,47 | 0,47 | 0,07 | 0,045 | 0,021 | 0,021 | 0,003 |
| Excepción pico y placa | 0,47 | 0,47 | 0,05 | 0,212 | 0,101 | 0,101 | 0,011 |
| Disponibilidad de áreas de carga/tanqueo | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,012 | 0,004 | 0,004 | 0,004 |
| Emisiones contaminantes | 0,45 | 0,45 | 0,09 | 0,033 | 0,015 | 0,015 | 0,003 |
| Eficiencia Energética | 0,43 | 0,43 | 0,14 | 0,019 | 0,008 | 0,008 | 0,003 |
| Impacto en ruido | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,006 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| Precio de adquisición | 0,40 | 0,40 | 0,20 | 0,261 | 0,104 | 0,104 | 0,052 |
| Impacto en la movilidad | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,052 | 0,017 | 0,017 | 0,017 |
| Percepción de seguridad | 0,20 | 0,20 | 0,60 | 0,052 | 0,010 | 0,010 | 0,031 |
| | | | | | 0,388 | 0,386 | 0,226 |

❖ **Escenario Alcanzable:** bajo este escenario se ajustó el modelo de tal manera que si bien no se llegase al escenario ideal, si se modificaron los factores para que sea lo mas cercano a una posibilidad alcanzable.

- Autonomía: Es necesario generar estaciones públicas de recarga para vehículos eléctricos, desarrollando su ubicación de tal manera que exista una por cada 3 de combustión tradicional.
- Disponibilidad de áreas de recarga: Ampliar las zonas de recarga, habilitando estructuras dentro de zonas de parqueaderos de residencias y en oficinas.
- Amnistía Arancelaria: es necesario generar políticas claras para que el costo de los vehículos eléctricos sea más económico frente a los costos actuales y que estos sean mas cercanos a los de combustión tradicional.

| Subcriterios | Valor de cada alternativa vs el criterio | | | Ponderación c/ subcriterio | Alternativas multiplicadas por el peso de cada subcriterio | | |
|--|--|------|-----------------|----------------------------|--|--------------|-----------------|
| | Renault ZOE | BYD | Renault Sandero | | Renault ZOE | BYD | Renault Sandero |
| Autonomia (Km recorridos) | 0,11 | 0,11 | 0,78 | 0,176 | 0,020 | 0,020 | 0,137 |
| Costos de Recargas/tanqueo | 0,45 | 0,45 | 0,09 | 0,084 | 0,038 | 0,038 | 0,008 |
| Costos de Mantenimiento | 0,49 | 0,43 | 0,08 | 0,046 | 0,023 | 0,020 | 0,004 |
| Amnistía arancelaria | 0,47 | 0,47 | 0,07 | 0,045 | 0,021 | 0,021 | 0,003 |
| Excepción pico y placa | 0,47 | 0,47 | 0,05 | 0,212 | 0,101 | 0,101 | 0,011 |
| Disponibilidad de áreas de carga/tanqueo | 0,22 | 0,22 | 0,56 | 0,012 | 0,003 | 0,003 | 0,007 |
| Emisiones contaminantes | 0,45 | 0,45 | 0,09 | 0,033 | 0,015 | 0,015 | 0,003 |
| Eficiencia Energética | 0,43 | 0,43 | 0,14 | 0,019 | 0,008 | 0,008 | 0,003 |
| Impacto en ruido | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,006 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| Precio de adquisición | 0,29 | 0,29 | 0,43 | 0,261 | 0,074 | 0,074 | 0,112 |
| Impacto en la movilidad | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,052 | 0,017 | 0,017 | 0,017 |
| Percepción de seguridad | 0,20 | 0,20 | 0,60 | 0,052 | 0,010 | 0,010 | 0,031 |
| | | | | | 0,333 | 0,330 | 0,337 |

6. Conclusiones

- Se requiere generar políticas o leyes, que reglamenten o sancionen el uso de vehículos con más de 20 años de antigüedad y que se apliquen sanciones reales para aquellos vehículos que generen emisiones contaminantes más allá de lo permitido. Uso de los resultados de la Revisión Tecnicomecánica RTM como fuente de información de la vida útil de un vehículo).
- Los encargados de formular políticas y los minoristas pueden aprovechar la

| | | | | | | | | | | |
|---------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|---------------|
| recorridos) | | | | | | | | | | nto |
| Costos de recarga/tanqueo | | | | | | | | | | Mantenimiento |

Anexo 2. Matriz de pares para los diferentes escenarios de estudio

| Alternativas | Renault ZOE | BYD | Combustible | Columna 2 | Columna 3 | Columna 4 |
|--------------|-------------|-----|-------------|-----------|-----------|-----------|
| Renault ZOE | 1 | 1 | 0,11 | 0,11 | 0,48 | 0,09 |
| BYD | 1 | 1 | 0,11 | 0,11 | 0,48 | 0,09 |
| Combustible | 9 | 9 | 1 | 81 | 4,33 | 0,82 |
| | | | | | 5,29 | 1,00 |

Alternativas Vs Recargas / Tanqueo

| Alternativas | Renault ZOE | BYD | Combustible | Columna 2 | Columna 3 | Columna 4 |
|--------------|-------------|-----|-------------|-----------|-----------|-----------|
| Renault ZOE | 1 | 1 | 5,00 | 5,00 | 1,71 | 0,45 |
| BYD | 1 | 1 | 5,00 | 5,00 | 1,71 | 0,45 |
| Combustible | 0,2 | 0,2 | 1 | 0,04 | 0,34 | 0,09 |
| | | | | | 3,76 | 1,00 |

Alternativas Vs Mantenimiento

| | Renault ZOE | BYD | Combustible | Columna 2 | Columna 3 | Columna 4 |
|-------------|-------------|-----|-------------|-----------|-----------|-----------|
| Renault ZOE | 1 | 1 | 7,14 | 7,14 | 1,93 | 0,49 |
| BYD | 1 | 1 | 5,00 | 5,00 | 1,71 | 0,43 |
| Combustible | 0,14 | 0,2 | 1 | 0,028 | 0,30 | 0,08 |
| | | | | | 3,94 | 1,00 |

Alternativas Vs Amnistía Arancelaria

| | Renault ZOE | BYD | Combustible | Columna 2 | Columna 3 | Columna 4 |
|--|-------------|-----|-------------|-----------|-----------|-----------|
|--|-------------|-----|-------------|-----------|-----------|-----------|

| | | | | | | |
|-------------|------|------|------|------|------|------|
| Renault ZOE | 1 | 1 | 7,00 | 7,00 | 1,91 | 0,47 |
| BYD | 1 | 1 | 7,00 | 7,00 | 1,91 | 0,47 |
| Combustible | 0,14 | 0,14 | 1,00 | 0,02 | 0,27 | 0,07 |
| | | | | | 4,10 | 1,00 |

Alternativas Vs Excepción pico y placa

| | Renault ZOE | BYD | Combustible | Columna 2 | Columna 3 | Columna 4 |
|-------------|-------------|------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| Renault ZOE | 1 | 1 | 9,00 | 9,00 | 2,08 | 0,47 |
| BYD | 1 | 1 | 9,00 | 9,00 | 2,08 | 0,47 |
| Combustible | 0,11 | 0,11 | 1,00 | 0,01 | 0,23 | 0,05 |
| | | | | | 4,39 | 1,00 |

Alternativas Vs Disponibilidad de áreas de carga/tanqueo

| | Renault ZOE | BYD | Combustible | Columna 2 | Columna 3 | Columna 4 |
|-------------|-------------|------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| Renault ZOE | 1 | 1 | 0,20 | 0,20 | 0,58 | 0,14 |
| BYD | 1 | 1 | 0,20 | 0,20 | 0,58 | 0,14 |
| Combustible | 5,00 | 5,00 | 1,00 | 25,00 | 2,92 | 0,71 |
| | | | | | 4,09 | 1,00 |

Alternativas Vs Emisiones contaminantes

| | Renault ZOE | BYD | Combustible | Columna 2 | Columna 3 | Columna 4 |
|-------------|-------------|------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| Renault ZOE | 1 | 1 | 5,00 | 5,00 | 1,71 | 0,45 |
| BYD | 1 | 1 | 5,00 | 5,00 | 1,71 | 0,45 |
| Combustible | 0,20 | 0,20 | 1,00 | 0,04 | 0,34 | 0,09 |
| | | | | | 3,76 | 1,00 |

Alternativas Vs Eficiencia Energética

| | Renault ZOE | BYD | Combustible | Columna 2 | Columna 3 | Columna 4 |
|-------------|-------------|------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| Renault ZOE | 1 | 1 | 3,00 | 3,00 | 1,44 | 0,43 |
| BYD | 1 | 1 | 3,00 | 3,00 | 1,44 | 0,43 |
| Combustible | 0,33 | 0,33 | 1,00 | 0,11 | 0,48 | 0,14 |
| | | | | | 3,37 | 1,00 |

Alternativas Vs Impacto de ruido

| | Renault ZOE | BYD | Combustible | Columna 2 | Columna 3 | Columna 4 |
|-------------|-------------|------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| Renault ZOE | 1 | 1 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,33 |
| BYD | 1 | 1 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,33 |
| Combustible | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,33 |
| | | | | | 3,00 | 1,00 |

Alternativas Vs Precio de adquisición

| | Renault ZOE | BYD | Combustible | Columna 2 | Columna 3 | Columna 4 |
|-------------|-------------|----------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| Renault ZOE | 1 | 0,333333 | 0,20 | 0,07 | 0,41 | 0,11 |
| BYD | 3 | 1 | 3,00 | 9,00 | 2,08 | 0,57 |
| Combustible | 5,00 | 0,33 | 1,00 | 1,67 | 1,19 | 0,32 |
| | | | | | 3,67 | 1,00 |

Alternativas Vs Impacto en la movilidad

| | Renault ZOE | BYD | Combustible | Columna 2 | Columna 3 | Columna 4 |
|-------------|-------------|------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| Renault ZOE | 1 | 1 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,33 |
| BYD | 1 | 1 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,33 |
| Combustible | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,33 |
| | | | | | 3,00 | 1,00 |

Alternativas Vs Percepción de seguridad

| | Renault ZOE | BYD | Combustible | Columna 2 | Columna 3 | Columna 4 |
|-------------|-------------|------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| Renault ZOE | 1 | 1 | 0,33 | 0,33 | 0,69 | 0,20 |
| BYD | 1 | 1 | 0,33 | 0,33 | 0,69 | 0,20 |
| Combustible | 3,00 | 3,00 | 1,00 | 9,00 | 2,08 | 0,60 |
| | | | | | 3,47 | 1,00 |

8. Referencias Bibliográficas

Ambiente, S. d. (2014). *Informe de sostenibilidad*. Bogotá.

Ambiente, S. d. (2016). *Datos e indicadores para medir la calidad del ambiente en Bogotá*. Bogotá: Recuperado el 03-10-2017 de:
<http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/indicadores>.

Avila Mogollon, L. (2000). El AHP (proceso Jerárquico analítico) y su aplicación para determinar los usos de las tierras. Santiago, Brasil.

Berumen, S., & Francisco, L. R. (2007). La utilidad de los métodos de decisión multicriterio en un entorno de competitividad creciente.

Gaitan, M., Cancino, J., & Beheretz, E. (2007). *Análisis del estado de la calidad del aire en bogota*. Recuperado el 28 de 04 de 2017, de
<http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n26/n26a11.pdf>

Garcia, G, Pedro. (2010). Una propuesta metodológica para la aplicación del porceso AHP en la selección de Autogeneradores, Madrid.

- Hernandez, A, H. (2014). Estrategias de mercadeo para impulsar la comercialización de vehículos eléctrico. Bogotá.
- J, Z. (2003). *Anomalías y supervivencia en el método de toma de decisiones de Saaty en Problemas de conocimiento de ingeniería y Geología*. Cordoba: Universitas.
- Jie Lu, G. Z. (2007). Multi-Objective Group Decision Making . En G. Z. Jie Lu, *Multi-Objective Group Decision Making* (págs. 3-15). Sydney: Imperial College Press.
- Montezuma, R. (2009). *Análisis del Perfil de salud urbana en bogotá*. bogotá: Organización Panamericana de la salud.
- Morales Q, B. (2014). *Modelo de masificación de vehículos eléctricos en Bogotá*. Recuperado el 15 de 05 de 2017, de <http://www.bdigital.unal.edu.co/48580/1/73575424.2015.pdf>
- Norregaard, J., & Valerie, R. H. (2000). *Control de contaminación mediante el uso de impuestos y licencias negociables*. Recuperado el 09 de 05 de 2017, de <https://www.imf.org/external/pubs/ft/issues/issues25/esl/issue25s.pdf>
- Productos, A. e. (2015). *Combustibles de automoción. Revisión y análisis comparativo de diferentes opciones*. Recuperado el 28 de 04 de 2017, de http://gasnam.es/wp-content/uploads/2016/02/Estudio-comparacion-carburantes-auto-_AOP-def2.pdf.
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic Hierarchy Process, Priority Setting Resource Allocation*.
- Stanislav Peregrin, J. J. (04 de 04 de 2016). Analytic hierarchy process as a tool for group evaluation of healthcare equipment. *International Journal of Business and Systems Resewrch*, págs. 2-4, 124-141.
- Toskano, H. G. (2010). *El proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores*. Recuperado el 10 de 04 de 2017, de isbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Basic/toskano_hg/cap3.PDF
- Tratadue, C., & Carranza, H. (2014). *La eficiencia energética en el transporte*. Recuperado el 13 de 05 de 2017, de www.petrotecnia.com.ar/octubre2014/Pdfs_SIN_Public/LaEficiencia.pdf
- Uribe, S. L. (2011). Debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas sobre el planteamiento de la energía eléctrica como alternativa para el transporte en Colombia. *Inventum*, 8.
- Victor, S. V. (2011). *Modelo de priorización de proyectos de inversión pública con enfoque multicriterio, caso: SEMAPA* . Recuperado el 12 de 04 de 2017, de <http://www.redalyc.org/pdf/4259/425941257004.pdf>