

SELECCIÓN DE LA CIUDAD PARA VIVIR MEDIANTE MODELOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO

Juan Manuel Izar Landeta¹*, José Adrián Nájera Saldaña*, Lizbeth Angélica Zárate Camacho*, Ma Leticia Izar Landeta**

* Tecnológico Nacional de México ITS Rioverde. Carretera Rioverde-San Ciró Km 4.5, CP 79610, Rioverde, S. L. P., México.

** Universidad Autónoma de San Luis Potosí UAMZM. Carretera Rioverde-San Ciró Km 4, CP 79610, Rioverde, S. L. P., México

ABSTRACT

The objective of this work was to select with multicriteria models the best city to live in the United States among 8 options with 17 decision criteria. The methodology consisted first of all in selecting the criteria, then prioritize their weights through Saaty's analytical hierarchical process (AHP), to then apply 4 multicriteria models, which were chosen: SAW, MOORA, TOPSIS and ELECTRE, which coincided in the 3 best cities of the 8 calculated, being the best Minneapolis. Even though for places fourth to eighth there were differences between the methods used, the important thing is that they all agreed on the selection of the best city, which was the objective of the study.

KEYWORDS: Analytic Hierarchical Process; Decision criteria; Decision alternatives; Decision multicriteria models.

MSC: 90B50

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue elegir mediante modelos multicriterio, la mejor ciudad para vivir en Estados Unidos entre 8 opciones con 17 criterios de decisión. La metodología consistió en seleccionar los criterios, luego priorizar sus pesos mediante el proceso de jerarquización analítica (AHP) de Saaty, para luego aplicar 4 modelos multicriterio, que se eligieron: SAW, MOORA, TOPSIS y ELECTRE, los cuales coincidieron en las 3 mejores ciudades de las 8 estimadas, siendo la mejor Minneapolis. Aun cuando para los lugares del cuarto al octavo hubo diferencias entre los métodos usados, lo importante es que todos coincidieron en la selección de la mejor ciudad, que era el objetivo del estudio.

PALABRAS CLAVE: Proceso de Jerarquización Analítica; Criterios de Decisión; Alternativas de Decisión; Modelos Multicriterio de Decisión.

1. INTRODUCCIÓN

La toma de decisiones es inherente al ser humano, quien debe hacer esto diariamente en cada una de las actividades que realiza. Hay decisiones intrascendentes, así como otras de suma importancia, las cuales son usuales en el ámbito administrativo, donde deben tomarse aquellas que optimicen el uso de los recursos y mejoren el desempeño organizacional y la rentabilidad económica.

Para llevar a cabo la toma de decisiones, las personas cuentan con información, que hoy en día, con el fenómeno de las redes sociales es abundante, por lo cual el decisor debe elegir cuál es la información relevante y cuál es intrascendente, a fin de eliminar ésta y dejar sólo la primera. Esta información suele tener elementos tangibles e intangibles, los cuales pueden ser igualmente importantes.

Es usual que las decisiones deban tomarse sin contar con toda la información necesaria para ello, lo que trae consigo asumir supuestos, lo que implica riesgo e incertidumbre.

En las organizaciones es deseable que las decisiones se tomen en forma racional y con un procedimiento lógico, que considere la información disponible. El decisor debe dejar de lado sus preferencias personales, a fin de llegar a la mejor decisión.

La decisión busca el mejor resultado, el cual cuando sólo hay un objetivo a alcanzar no representa un serio problema, sin embargo, en la vida real la mayoría de las veces hay múltiples criterios y el proceso de decisión no

¹ Email: jmizar@hotmail.com

es sencillo. Estos casos pueden manejarse con los modelos multicriterio de decisión, en los cuales se busca una solución, que aun cuando no sea la óptima en cada uno de los criterios, sí sea la que más se aproxima al mejor resultado, ya que muchas veces el mejoramiento en un criterio trae aparejado el detrimento en otro, conforme a la optimalidad paretiana. El análisis de decisión multicriterio tiene como objetivo encontrar la solución más favorable y clasificar todas las alternativas de decisión, combinando los valores de muchos criterios de evaluación en números fáciles de interpretar, uno por cada opción de decisión.

Este trabajo presenta el caso de una pareja norteamericana recién casada con preparación académica, que debe elegir entre 8 ciudades de Estados Unidos, la mejor para residir, bajo 17 criterios que ha elegido la pareja para tomar su decisión, los cuales se priorizan en primer lugar mediante la metodología del Proceso Analítico de Jerarquización (AHP) de Saaty, para luego elegir la mejor ciudad, utilizando 4 modelos multicriterio: SAW, que es un método sencillo y de puntuación directa; MOORA, que pertenece a los modelos que se basan en una función de utilidad; TOPSIS, que es de las metodologías que miden la distancia respecto a la solución ideal; y ELECTRE, que es un modelo multicriterio de superación.

Hay muchos académicos que señalan que puede haber diferencia en el resultado entre los diversos modelos multicriterio utilizados, es por tal razón que se han seleccionado los 4 antes mencionados para ver si hay coincidencia en sus resultados y llegar a la mejor decisión para la pareja.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Hay un gran número de publicaciones de la aplicación de los modelos multicriterio a un sinnúmero de casos. Haciendo una revisión de la literatura reciente sobre esto, se han encontrado un gran número de publicaciones, de las cuales se comentan algunas de ellas.

Algunos académicos han aplicado el análisis multicriterio en la promoción de estrategias de gestión de residuos y energía, empleando varios modelos, pero siendo el proceso de jerarquización analítica de Saaty (AHP) el más frecuente ([22]). Otros ([9]) han hecho uso de estos modelos para la toma de decisiones en manufactura sustentable, mientras que otros han evaluado el desempeño de modelos multicriterio difusos para el análisis de sistemas emergentes por la pandemia de COVID-19 ([4]).

Otros autores por su parte, recomiendan una nueva taxonomía para la aplicación de los modelos multicriterio ([3]), y en otro estudio, presentan una revisión de los modelos multicriterio buscando una propuesta unificada de las características del proceso de decisión de los modelos ([2]). Por su parte, otros investigadores lo han aplicado en la evaluación de tecnologías de salud buscando abordar los desafíos metodológicos para mejorar el estado del arte ([14]), mientras que otros más han buscado la mejora del proceso de construcción del conocimiento en los modelos multicriterio ([21]).

En Vietnam, otros académicos han aplicado los modelos multicriterio junto con técnicas de aprendizaje profundo (deep learning) al caso de evaluación de riesgos de inundación ([15]) y otros han efectuado una revisión del análisis multicriterio al caso de desmantelamiento de instalaciones de gas y petróleo ([11]). Mientras que otros investigadores hicieron un estudio comparativo de los métodos de ponderación de criterios usados en los modelos multicriterio al caso de cuidado de la salud en países de ingresos medios y bajos ([13]).

En Bangladesh, se usaron modelos multicriterio con aprendizaje automático para evaluar la susceptibilidad a inundaciones ([16]) y otros estudiosos los aplicaron al caso de evaluar pilas de combustible para barcos ([7]). Por su parte, en Irán, otros investigadores usaron modelos multicriterio junto con sistemas de información geográfica (GIS) para la selección de sitios de vertedero ([10]).

En otro ámbito de aplicaciones, otros autores lo aplicaron al caso de evaluar lo amigable con el ambiente de líquidos iónicos ([1]). Otros han incluido consideraciones de tipo social en el análisis multicriterio para la localización de sitios para la instalación de celdas fotovoltaicas ([19]). Por su parte, Ruiz et al. ([17]) han aplicado GIS-AHP para la localización óptima de plantas de energía solar en Indonesia y Hamurcu y Eren ([5]) lo usaron para la selección de autobuses eléctricos para un transporte ecológico y otros académicos ([6]) lo aplicaron en la búsqueda de combustibles marinos alternativos involucrando a gente interesada en Suecia, mientras que Mojaver et al. ([12]) han realizado un estudio comparativo de gasificación de residuos plásticos y biomasa convencional usando AHP y TOPSIS. Por su parte en Irán, otros investigadores aplicaron los modelos multicriterio en la evaluación potencial de granjas de energía renovable ([18]).

Esto da una clara idea del gran número de aplicaciones de los modelos multicriterio en una variedad y diversidad de situaciones.

En cuanto a la búsqueda de información de las características de las ciudades, hay numerosos sitios web que ofrecen información comparativa a sus visitantes, con el fin de brindarles lo necesario para un buen análisis en la

toma de una decisión en particular. Dichos sitios, son sumamente amigables con el usuario y le proporcionan tablas con datos en paralelo de distintas opciones del mercado para facilitar el cotejo. Walk Score es uno de éstos, con información sumamente útil sobre espacios disponibles para caminata, tránsito y bicicleta. Se encuentran además datos sobre departamentos en renta, casas en venta y las características promedio de éstas.

Las ciudades que ha elegido la pareja como posibles sitios para su futura residencia son Minneapolis en Minnesota, Seattle en el estado de Washington, Denver y Boulder en el estado de Colorado, Portland, Oregon, Austin en Texas, Pittsburgh en Pennsylvania y Boise en Idaho. Enseguida se presenta una breve descripción de cada una de estas ciudades en cuanto a características de tránsito, población y vivienda, tomadas de la fuente Walk Score ([23]).

Minneapolis, Minnesota

Minneapolis está rodeada por muchos lagos y las orillas del río Mississippi. El programa de bicicletas Nice Ride de la ciudad, ofrece más de 100 quioscos dedicados a compartir bicicletas y la Cadena de Lagos está conectada por 34 millas de carriles exclusivos para bicicletas, que brindan amplios senderos para andar en bicicleta, correr y caminar.

Minneapolis METRO opera una red de autobuses, trenes ligeros y trenes suburbanos. Es conocida como una ciudad altamente habitable, con gran acceso a la naturaleza y una próspera escena artística. También tiene reputación de ciudad inteligente por sus centros de investigación privados y universitarios, sus ensayos médicos, la conservación de energía y su población altamente educada. Los empleadores más grandes de Minneapolis incluyen la Universidad de Minnesota, Target y Wells Fargo. Es la undécima ciudad grande más transitable a pie de los EE. UU. con 382,578 residentes ([23]).

Rango	Nombre	Puntuación de caminata	Puntaje de tránsito	Puntaje de bicicleta	Población
1	Lago Lyn	96	62	97	1,466
2	Centro Oeste	93	87	90	5,370
3	Este de la colina de Lowry	93	61	95	4,918
4	Zona residencial	93	58	94	2,310
5	Parque Loring	91	78	86	7,714

Tabla 1. Vecindarios de Mineápolis. Fuente: ([23]).

Las características promedio de una casa en Minneapolis son: 2100 pies cuadrados de construcción, 3.3 dormitorios, 2.2 baños, 43 años de edad del hogar y 13 años viviendo en ella.

Seattle, Washington

Seattle se está convirtiendo rápidamente en una ciudad transitable de clase mundial. La nueva línea de tren ligero de Sound Transit conecta la ciudad y el aeropuerto. La gente se está mudando a Seattle para trabajar en empresas como Amazon, Microsoft y Starbucks.

Seattle está rodeada por las montañas Olympic y Cascade y por el lago Washington y Puget Sound. La arquitectura del vecindario de Seattle abarca desde viviendas unifamiliares en Wallingford, hasta apartamentos de gran altura en el centro.

Seattle es la novena ciudad grande más transitable a pie en los EE. UU. con 608,660 residentes ([23]).

Rango	Nombre	Puntuación de caminata	Puntaje de tránsito	Puntaje de bicicleta	Población
1	Centro	98	100	70	5,059
2	Distrito Internacional	98	100	83	3,396
3	Belltown	98	97	76	14,163
4	Primera colina	98	98	79	9,294
5	Plaza pionera	97	100	78	4,159

Tabla 2. Vecindarios de Seattle. Fuente: ([23]).

Las características promedio de una casa en Seattle son: 2200 pies cuadrados de construcción, 3.3 dormitorios, 2.3 baños, 39 años de edad del hogar y 12 años viviendo en ella.

Denver, Colorado

Mile High City tiene cielos azules, fácil acceso a pistas increíbles y al aire libre de las Montañas Rocosas.

Denver tiene una economía en crecimiento en profesiones de tecnología, telecomunicaciones y medicina. Con su paisaje llano, la zona urbana de Denver es una gran ciudad para ciclistas. El tren ligero y los autobuses de RTD

dan servicio al centro y a los vecindarios periféricos y hay varias líneas expés al Aeropuerto Internacional de Denver.

El tren ligero atraviesa el corazón del corredor peatonal del centro. Five Points es el hogar de muchas de las famosas microcervecías de Denver y tiene excelentes restaurantes. En City Park, se encuentra el zoológico, el planetario y el Museo de la Naturaleza y la Ciencia. Denver es la decimosexta ciudad grande más transitable a pie en los EE. UU. con 600,158 residentes ([23]).

Rango	Nombre	Puntuación de caminata	Puntaje de tránsito	Puntaje de bicicleta	Población
1	Centro	94	81	94	15,382
2	Colina del capitolio	94	60	96	14,685
3	Cinco puntos	90	67	98	12,709
4	Parque de la ciudad oeste	87	52	96	4,854
5	Parque Cheesman	86	51	92	7,984

Tabla 3. Vecindarios de Denver. Fuente: ([23]).

Las características promedio de una casa en Denver son: 2300 pies cuadrados de construcción, 3.4 dormitorios, 2.5 baños, 35 años de edad del hogar y 11 años viviendo en ella.

Boulder, Colorado

Boulder es una ciudad ubicada en el condado de Boulder en el estado de Colorado. Es el hogar del campus principal de la Universidad de Colorado. Tiene un puntaje de caminata promedio de 56 con 97,385 residentes; tiene algo de transporte público y se puede andar en bicicleta. Se estima que su población es de 105,673 a partir de 2019 ([23]).

Rango	Nombre	Puntuación de caminata	Puntaje de tránsito	Puntaje de bicicleta	Población
1	Goss - Arboleda	89	61	100	1,783
2	Colina de la universidad	88	60	89	4,793
3	Whittier	86	53	94	4,918
4	Centro	84	52	90	1,210
5	Colina de Mapleton	83	52	86	1,133

Tabla 4. Vecindarios de Boulder. Fuente: ([23]).

Portland, Oregon

Portland podría ser la ciudad más amigable para caminar, andar en bicicleta y usar el transporte público en la costa oeste. La mayoría de los vecindarios tienen carritos de comida transitables, supermercados, cines y cafeterías.

Los vecindarios de Portland son una mezcla de casas artesanales clásicas, apartamentos de alquiler y condominios de nueva construcción, algunos de ellos construidos ecológicamente y con certificación LEED. Hollywood tiene tres líneas MAX y cuatro líneas de autobús. Northwest ofrece la máxima densidad, mientras que Healy Heights y Sylvan-Highlands tienen excelentes escuelas. Pearl District es el hogar de una serie de nuevas empresas de tecnología y diseño y una próspera escena de restaurantes que encanta a los amantes de la comida. Portland es la decimotercera ciudad grande más transitable a pie en los EE. UU. con 583,776 residentes ([23]).

Rango	Nombre	Puntuación de caminata	Puntaje de tránsito	Puntaje de bicicleta	Población
1	Perla	98	86	98	5,989
2	Barrio chino del casco antiguo	97	91	98	3,873
3	Centro	96	90	90	12,803
4	Hollywood	94	67	95	1,274
5	núcleos	94	62	98	5,336

Tabla 5. Vecindarios de Portland. Fuente: ([23]).

Las características promedio de una casa en Portland son: 2800 pies cuadrados de construcción, 3.3 dormitorios, 2.2 baños, 39 años de edad del hogar y 11 años viviendo en ella.

Austin, Texas

Austin es la trigésima ciudad grande más transitable a pie en los EE. UU. con un Walk Score de 42 y 790,390 residentes.

Austin tiene algo de transporte público y se puede andar en bicicleta ([23]).

Rango	Nombre	Puntuación de caminata	Puntaje de tránsito	Puntaje de bicicleta	Población
1	Centro	92	68	90	7,412
2	Universidad del Oeste	92	65	94	15,358
3	Universidad de Texas-Austin	89	72	93	8,338
4	Universidad del norte	84	66	92	4,747
5	Oriente César Chávez	84	49	93	3,278

Tabla 6. Vecindarios de Austin. Fuente: ([23]).

Las características promedio de una casa en Austin son: 2200 pies cuadrados de construcción, 3.4 dormitorios, 2.4 baños, 23 años de edad del hogar y 11 años viviendo en ella.

Pittsburgh, Pennsylvania

Pittsburgh tiene un Walk Score promedio de 62 con 305,704 residentes. Tiene un buen transporte público y es un poco transitable en bicicleta. Algunas diligencias se pueden realizar a pie ([23]).

Rango	Nombre	Puntuación de caminata	Puntaje de tránsito	Puntaje de bicicleta	Población
1	Centro	95	98	75	3,818
2	Pisos del lado sur	93	sesenta y cinco	92	6,490
3	Amistad	92	68	91	1,354
4	Bloomfield	92	62	89	8,722
5	Oakland central	92	68	75	5,511

Tabla 7. Vecindarios de Pittsburgh. Fuente: ([23]).

Las características promedio de una casa en Pittsburgh son: 2000 pies cuadrados de construcción, 3.2 dormitorios, 2.1 baños, 52 años de edad del hogar y 14 años viviendo en ella.

Boise, Idaho

Boise, la "ciudad de los árboles" es la capital de Idaho y su ciudad más grande, conocida por su belleza natural, museos y actividades al aire libre. En las faldas de las montañas Rocallosas y a lo largo del río Boise, aquí se vive la vida en el exterior. Desde esquiar en Bogus Basin y practicar kayak en los ríos, hasta hacer senderismo, ciclismo y observación de aves, hay muchas formas de disfrutar y apreciar la naturaleza. Tomar una larga caminata o ir en bicicleta a recorrer el sendero Boise River Greenbelt, que es un camino pavimentado de 35.4 kilómetros (22 millas) arbolados que sigue al río a través de la ciudad y abarca numerosos parques y hábitats de vida silvestre. El camino corre a ambos lados del río y se puede llegar a él desde varias calles y puentes de la ciudad ([23]).

Rango	Nombre	Puntuación de caminata	Puntaje de tránsito	Puntaje de bicicleta	Población
1	Centro	90	44	99	7 028

Tabla 8. Vecindarios de Boise. Fuente: ([23]).

Por otra parte, está US News World Report ([20]), otro sitio web donde se pueden encontrar comparativas en relación a: noticias, educación, salud, finanzas, viajes, carros, bufets de abogados, sistemas de gestión de parques y bienes raíces.

Para comparar las categorías relacionadas a cuestiones de gestión pública como sustentabilidad, temperaturas, costo de vida, resiliencia al cambio climático, política pública y ambiente político, se utilizaron páginas oficiales de cada ciudad y estado.

Con base en esta información, a continuación, se presentan los fundamentos de cada modelo multicriterio antes de aplicarlos al caso.

3. METODOLOGÍA

Se explican en este apartado los 4 modelos multicriterio usados en el caso de estudio.

Método SAW

El SAW, por sus siglas en Inglés (Simple Additive Weighting), Método de Ponderación Aditiva Simple, es un método de puntuación directa y de los más antiguos, el cual integra los valores de los criterios con sus pesos en una medida, lo que permite comparar las diferentes opciones de decisión conforme a su puntuación obtenida. Este método es quizás el más antiguo de los modelos de puntuación directa y se ha aplicado para la toma de decisiones. Consiste en seguir los siguientes pasos ([8]):

1. Se forma la matriz de decisión, la cual lleva en sus filas las m alternativas de decisión y en sus columnas los n criterios.
2. Se obtiene el peso de los criterios W_j , con alguna metodología de priorización, debiendo su suma ajustarse a la unidad.
3. Se obtiene la matriz normalizada, en la cual cada elemento de la misma, denotado como r_{ij} se calcula con las ecuaciones (1) para los criterios a maximizar y la (2) para los de minimización:

$$r_{ij} = \frac{X_{ij}}{\text{Max}_j X_{ij}} \tag{1}$$

$$r_{ij} = \frac{\text{Min}_j X_{ij}}{X_{ij}} \tag{2}$$

Siendo X_{ij} el elemento de la matriz de decisión ubicado en la fila i y columna j.

En caso que hubiese elementos con valores negativos en la matriz de decisión, éstos se transforman mediante la siguiente ecuación:

$$r_{ij} = X_{ij} + |\text{Min}_j X_{ij}| + 1 \tag{3}$$

Con esto, el valor negativo mínimo se convierte en uno.

4. Se calcula entonces la puntuación de cada alternativa mediante la siguiente fórmula:

$$S_i = \sum_{j=1}^n W_j r_{ij} \tag{4}$$

5. Se ordenan las alternativas conforme a su valor de S_i , siendo la mejor aquella que haya obtenido el puntaje máximo.

Método MOORA

El método MOORA (Multi Objective Optimization on basis of Ratio Analysis) Método Multi Objetivo de Optimización con base en el Análisis de Proporciones, creado por Brauers y Zavadskas desde hace dos décadas, permite evaluar las opciones de decisión cuando las unidades de medición de los criterios son muy diferentes entre sí. Estos criterios se homologan con un proceso de normalización, para hacer la evaluación de alternativas con una mejor base.

La metodología consta de los pasos siguientes ([8]):

1. Determinar la matriz inicial de decisión, en la cual las opciones de decisión se ubican como filas y los criterios como columnas.
2. Definir los pesos de los criterios, W_j conforme a su importancia.
3. Obtener la matriz de radios normalizada y ponderada por los pesos de los criterios, donde cada elemento se obtiene mediante la ecuación siguiente:

$$x_{ij}^* = \frac{W_j X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m X_{ij}^2}} \tag{5}$$

Donde:

- x_{ij}^* = Elemento normalizado ponderado de la fila i y columna j
- X_{ij} = Elemento de la matriz de decisión de la fila i y columna j
- W_j = Peso del criterio de la columna j
- m = Número de alternativas de decisión

4. Se calcula la función de agregación para cada alternativa Y_i , por medio de la ecuación (6):

$$Y_i = \sum_{j=1}^g x_{ij}^* - \sum_{j=g+1}^n x_{ij}^* \quad (6)$$

En esta ecuación suman los g criterios que se desea maximizar y restan los n-g criterios que buscan minimizarse. 5. Se ordenan las alternativas de decisión conforme a su valor de la función de agregación, en orden descendente, siendo la mejor opción la que haya obtenido el valor máximo de Y_i .

Método TOPSIS

Este método fue creado por C. L. Hwang y K. Yoon a inicios de la década de los 80 y su nombre es una abreviación de Technique for Ordering Preference by Similarity to an Ideal Solution (Técnica de ordenación de preferencias por su similaridad a una solución ideal), basado en el axioma de Zeleny que señala que es racional seleccionar aquella opción de decisión que quede lo más próxima a la solución ideal, o lo más alejada a la solución antiideal.

Wang y Luo ([28]) afirman que una de las desventajas de este modelo es que en caso de eliminarse una de las opciones iniciales de decisión, el orden de clasificación de las mismas podría invertirse, lo que representa un inconveniente para el decisor, ya que no habría confiabilidad del método.

Si una alternativa cumple con ser la más próxima a la ideal y la más lejana a la antiideal, es la que debe seleccionarse. Sin embargo, puede darse el caso que la opción más cercana a la ideal no sea la más alejada a la antiideal, por lo cual se introduce el concepto de similaridad, el que se explica más adelante y permite obtener una puntuación para cada opción de decisión, de modo que se elija la que resulte con el puntaje máximo.

La metodología consta de los siguientes pasos ([8]):

1. Se plantea y obtiene la matriz de decisión, colocando en ella a los criterios como columnas y las opciones de decisión como filas, quedando de la manera siguiente:
2. Se obtienen los pesos de los criterios, W_j , mediante algún método de ponderación, debiendo su suma ser la unidad:
3. Normalizar vectorialmente la matriz de decisión con la fórmula siguiente:

$$v_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m X_{ij}^2}} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

Siendo v_{ij} el elemento normalizado de la fila i, columna j.

4. Obtener la matriz normalizada ponderada, en la cual cada elemento, p_{ij} , se obtiene con la ecuación siguiente:

$$p_{ij} = v_{ij} W_j \quad (8)$$

5. Para cada criterio, encontrar su alternativa ideal, I_j^+ , y su alternativa antiideal, I_j^- , que se obtienen para cada columna de la matriz normalizada ponderada: para aquellos criterios a maximizar, el valor máximo de la columna, será (I^+) y el valor mínimo será (I^-); por su parte para los criterios a minimizar, será lo opuesto, el valor mínimo de la columna define (I^+) y el elemento de valor máximo (I^-).

6. Se obtiene para cada alternativa i, la distancia ideal positiva, d_i^+ , con la fórmula:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (p_{ij} - I_j^+)^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

Y la distancia antiideal, d_i^- :

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (p_{ij} - I_j^-)^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

7. Se calcula para cada opción de decisión, su índice de similaridad, D_i^+ , mediante la relación matemática:

$$D_i^+ = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (11)$$

8. Se clasifican las alternativas conforme al orden decreciente de su índice de similaridad, de modo que la mejor será la que haya alcanzado el valor máximo de este índice.

Método ELECTRE

Este método es de superación o outranking y fue creado por Bernard Roy, quien desde la década de los 60 hizo su primera versión (ELECTRE I), su nombre es una abreviación de ELimination Et Choix Traduisant la REALité. ELECTRE I, aun cuando es la primera versión de esta metodología, tiene la ventaja que maneja criterios verdaderos y no pseudo-criterios.

Existen otras versiones del método, como es el caso de ELECTRE II, III, IV, IS y TRI, que varían respecto a la versión original de Roy, en la manera de definir los índices y umbrales de concordancia y discordancia.

Es una de las metodologías más utilizadas en el ámbito administrativo para solucionar problemas multicriterio, por tal razón se ha elegido su aplicación al caso bajo estudio. Es apropiada cuando crece el número de criterios, entre los que puede haber de tipo cualitativo y cuantitativo, o bien, si las opciones de decisión pueden medirse de manera cardinal y la escala de medida de los criterios es heterogénea.

El procedimiento es el siguiente ([8]): inicia con definir los pesos de los criterios W_j , conforme a su importancia y en caso que no sumen la unidad, se normalizan por la suma.

Luego se obtiene la matriz inicial, que consta de m filas y n columnas, ubicando en las filas a cada opción de decisión y en las columnas los criterios de evaluación.

Se obtiene entonces la matriz normalizada, lo que se hace dependiendo si el criterio de cada columna se desea maximizar o minimizar.

Para los criterios a maximizar, los elementos de esa columna deberán normalizarse mediante la siguiente ecuación:

$$v_{ij} = \frac{X_{ij} - \text{Min}X_{ij}}{\text{Max}X_{ij} - \text{Min}X_{ij}} \quad (12)$$

Y para los que se deban minimizar con la fórmula siguiente:

$$v_{ij} = \frac{\text{Max}X_{ij} - X_{ij}}{\text{Max}X_{ij} - \text{Min}X_{ij}} \quad (13)$$

Después se obtiene la matriz normalizada ponderada, lo cual se logra multiplicando el elemento de cada columna j de esta matriz por el peso del criterio correspondiente a la columna, W_j , conforme a la siguiente ecuación:

$$s_{ij} = v_{ij}W_j \quad (14)$$

Luego se procede a estimar la matriz de *concordancias*, que es cuadrada de m filas x m columnas, ubicándose cada alternativa como fila y columna, sin elementos en su diagonal principal, ya que no tiene sentido comparar una alternativa consigo misma.

Los elementos de la matriz se obtienen de la manera siguiente: el elemento de la fila h y columna i , denominado C_{hi} , será la sumatoria de los pesos de los criterios W_j , en los cuales el elemento de la alternativa h supere al de la i , más la mitad de aquellos pesos en los que están empatados los elementos de ambas opciones, mientras que el elemento transpuesto, o sea de la fila i y columna h , será la diferencia del valor obtenido antes respecto a la unidad. Para el cálculo del elemento de la fila h y columna i , se aplica la ecuación siguiente:

$$C_{hi} = \sum_j^{S_{hj} > S_{ij}} W_j + \frac{1}{2} \sum_j^{S_{hj} = S_{ij}} W_j \quad (15)$$

Y para el elemento transpuesto C_{ih} :

$$C_{ih} = 1 - C_{hi} \quad (16)$$

Se procede entonces a obtener la matriz de *discordancias*, la cual es de la misma dimensión que la anterior, (de m x m), siendo m el número de opciones de decisión y, de la misma manera, tendrá vacías las celdas de la diagonal principal, mientras que los elementos restantes se obtienen de la manera siguiente: el elemento de la fila h y columna i , D_{hi} , se obtiene al comparar la fila h con la i tras aplicar la siguiente ecuación:

$$D_{hi} = \frac{\text{Max}_{S_{hj} < S_{ij}} |s_{hj} - s_{ij}|}{\text{Max}_j |s_{hj} - s_{ij}|} \quad (17)$$

Es el cociente de la diferencia máxima con la que un elemento de la fila i sea mayor al correspondiente a la fila h , dividido entre la máxima diferencia que haya entre el comparativo de todos los elementos de ambas filas. En caso de no haber ningún elemento de la fila i que supere al correspondiente elemento de la fila h , el elemento de la matriz de discordancias D_{hi} es cero.

Enseguida se procede a obtener los umbrales de concordancia UC y discordancia UD, siendo el primero de ellos el promedio de todos los elementos de la matriz de concordancias y el segundo el promedio de todos los elementos de la matriz de discordancias.

Luego se obtiene la matriz de *dominancias concordante*, lo que se lleva a efecto a partir de la matriz de concordancias, según la condición siguiente:

Si $C_{hi} \geq UC$, su valor es 1

Si $C_{hi} < UC$, su valor es 0

Con lo cual esta matriz sólo tendrá ceros y unos.

Se hace algo similar con la matriz de discordancias para llegar a la matriz de *dominancias discordante*, que se obtiene conforme a lo siguiente:

Si $C_{hi} \leq UD$, su valor es 1

Si $C_{hi} > UD$, su valor es 0

La cual también contendrá sólo ceros y unos.

Después se obtiene la matriz de *dominancia agregada*, en la que cada elemento se calcula como el producto del respectivo elemento de la matriz de dominancias concordante, multiplicado por el correspondiente elemento de la matriz de dominancias discordante (elemento ubicado en la misma posición).

Finalmente, lo que se hace es obtener la sumatoria de cada fila y cada columna de esta matriz.

Para analizar las dominancias entre las opciones de decisión, lo que se hace es que de la matriz de dominancia agregada se revisa por fila aquellas celdas que tengan un valor de uno, lo que significa que la opción correspondiente a la fila domina a la de la columna; y de manera similar, a nivel de cada columna, donde aparezca un cero representa que la alternativa de la columna domina a la de la fila.

Habiendo definido las dominancias, se procede a elaborar el *grafo de dominancias*, donde cada alternativa se representa por un círculo y las dominancias por flechas unidireccionales, las que indican que la opción de donde sale la flecha domina a aquella a donde llega la punta de la flecha.

4. RESULTADOS

Aplicación al caso

El caso trata la elección de la mejor ciudad para vivir de un matrimonio americano joven y con preparación académica, contando con 8 posibles ciudades en Estados Unidos, las cuales ya se han mencionado. Esta decisión debe tomarse considerando para ello 17 criterios de decisión elegidos, los cuales son los que se listan en la tabla 9.

Número de Criterio	Descripción del Criterio
1	Políticas Públicas de la Ciudad (Sostenibilidad)
2	Costo de la Vida
3	Cercanía de Familiares y Amigos
4	Mercado Laboral Tecnológico
5	Caminos Pavimentados para el Ciclismo
6	Áreas Verdes en la Ciudad
7	Áreas Naturales al Aire Libre Fuera de Límites de la Ciudad
8	Actividades al Aire Libre
9	Políticas Locales y Estatales
10	Políticas Públicas
11	Sistemas de Bibliotecas
12	Clima
13	Resiliencia al Riesgo del Cambio Climático
14	Principales Industrias
15	Cultura de la Ciudad
16	Sistemas de Transporte (Aéreo, Terrestre, Infraestructura de Autos Eléctricos)
17	Comida (Tiendas, Restaurantes)

Tabla 9. Los 17 criterios de selección del mejor sitio. Fuente: elaboración propia.

Lo primero es priorizar los 17 criterios para darles un peso a cada uno de ellos conforme a su importancia, para lo cual se aplicó el AHP de Saaty, que es uno de los métodos más conocidos para tal fin.

Al hacer los comparativos para el AHP, la matriz es la siguiente:

Criterios 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17

1	1	0.333	0.333	0.5	1	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1	1	1	0.5	0.5	1
2	3	1	1	2	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3
3	3	1	1	2	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3
4	2	0.5	0.5	1	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	2
5	1	0.333	0.333	0.5	1	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1	1	1	0.5	0.5	1
6	2	0.5	0.5	1	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	2
7	2	0.5	0.5	1	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	2
8	2	0.5	0.5	1	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	2
9	2	0.5	0.5	1	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	2
10	1	0.333	0.333	0.5	1	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1	1	1	0.5	0.5	1
11	1	0.333	0.333	0.5	1	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1	1	1	0.5	0.5	1
12	1	0.333	0.333	0.5	1	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1	1	1	0.5	0.5	1
13	1	0.333	0.333	0.5	1	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1	1	1	0.5	0.5	1
14	1	0.333	0.333	0.5	1	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1	1	1	0.5	0.5	1
15	2	0.5	0.5	1	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	2
16	2	0.5	0.5	1	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	2
17	1	0.333	0.333	0.5	1	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1	1	1	0.5	0.5	1

Tabla 10. Matriz de comparaciones pareadas de los criterios. Fuente: elaboración propia.

Al aplicar la metodología de Saaty, se llega a los pesos de cada criterio, que se listan en la tabla 11. La razón de consistencia del análisis ha sido de 0.00125, que indica que los resultados son consistentes, siendo los criterios más importantes el 2 y 3, que son el costo de la vida y la cercanía a la ciudad de familiares y amigos, respectivamente.

Número de Criterio	Peso del Criterio
1	0.0353
2	0.1197
3	0.1197
4	0.0683
5	0.0353
6	0.0683
7	0.0683
8	0.0683
9	0.0683
10	0.0353
11	0.0353
12	0.0353
13	0.0353
14	0.0353
15	0.0683
16	0.0683
17	0.0353

Tabla 11. Pesos de los 17 Criterios. Fuente: elaboración propia.

Lo siguiente es evaluar cada ciudad respecto a cada criterio, para lo cual se ha utilizado una escala de 1 a 5 como evaluación, siendo 5 el máximo y 1 el mínimo, según se considere cómo califica la ciudad respecto a cada criterio.

Las evaluaciones de la pareja se muestran en la tabla 12.

Criterio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Minn	5	4	5	2	5	5	4	4	5	5	5	3	4	4	4	4	4
Seattle	5	2	1	5	4	5	5	5	5	5	5	3	3	5	4	4	5
Denver	4	3	2	4	4	4	5	5	5	5	4	5	2	4	4	3	4
Boulder	4	3	2	4	5	5	5	5	5	5	4	5	2	4	4	4	3

Portland	5	3	1	3	5	5	5	5	5	5	4	4	3	4	4	4	5
Austin	5	4	2	4	2	3	3	4	3	3	4	5	3	5	4	2	5
Pitts	4	5	5	2	2	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3
Boise	3	5	1	3	3	3	4	5	3	3	3	4	4	4	3	2	2

Tabla 12. Evaluación de las ciudades respecto a cada criterio. Fuente: elaboración propia.

El paso siguiente es la aplicación de cada uno de los 4 modelos multicriterio al caso, como son el SAW, MOORA, TOPSIS y ELECTRE.

Para el primer modelo, el SAW, al aplicar la metodología se obtiene la matriz normalizada, la cual es la siguiente:

Criterio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Minn	1	0.8	1	0.4	1	1	0.8	0.8	1	1	1	0.6	1	0.8	1	1	0.8
Seattle	1	0.4	0.2	1	0.8	1	1	1	1	1	1	0.6	0.75	1	1	1	1
Denver	0.8	0.6	0.4	0.8	0.8	0.8	1	1	1	1	0.8	1	0.5	0.8	1	0.75	0.8
Boulder	0.8	0.6	0.4	0.8	1	1	1	1	1	1	0.8	1	0.5	0.8	1	1	0.6
Portland	1	0.6	0.2	0.6	1	1	1	1	1	1	0.8	0.8	0.75	0.8	1	1	1
Austin	1	0.8	0.4	0.8	0.4	0.6	0.6	0.8	0.6	0.6	0.8	1	0.75	1	1	0.5	1
Pitts	0.8	1	1	0.4	0.4	0.8	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1	0.8	1	0.75	0.6
Boise	0.6	1	0.2	0.6	0.6	0.6	0.8	1	0.6	0.6	0.6	0.8	1	0.8	0.75	0.5	0.4

Tabla 13. Matriz normalizada con SAW. Fuente: elaboración propia.

De esta matriz, con la ecuación (4) se obtiene el puntaje de las opciones, que se muestran en la tabla 14:

Opción	Puntaje	Lugar
Minneapolis	0.880	1
Seattle	0.802	4
Denver	0.783	6
Boulder	0.814	2
Portland	0.799	5
Austin	0.710	7
Pittsburgh	0.803	3
Boise	0.666	8

Tabla 14. Puntaje de cada opción. Fuente: elaboración propia.

Las 3 ciudades con mayor puntaje han sido Minneapolis, Boulder y Pittsburgh.

Si se aplica MOORA, la matriz de radios normalizada se presenta en la tabla 15:

Criterio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Minn.	0.014	0.045	0.074	0.014	0.016	0.028	0.022	0.021	0.027	0.014	0.015	0.009	0.016	0.012	0.025	0.029	0.012
Seattle	0.014	0.023	0.015	0.034	0.013	0.028	0.028	0.026	0.027	0.014	0.015	0.009	0.012	0.015	0.025	0.029	0.016
Denver	0.011	0.034	0.030	0.027	0.013	0.022	0.028	0.026	0.027	0.014	0.012	0.015	0.008	0.012	0.025	0.022	0.012
Boulder	0.011	0.034	0.030	0.027	0.016	0.028	0.028	0.026	0.027	0.014	0.012	0.015	0.008	0.012	0.025	0.029	0.009
Portland	0.014	0.034	0.015	0.021	0.016	0.028	0.028	0.026	0.027	0.014	0.012	0.012	0.012	0.012	0.025	0.029	0.016
Austin	0.014	0.045	0.030	0.027	0.006	0.017	0.017	0.021	0.016	0.008	0.012	0.015	0.012	0.015	0.025	0.014	0.016
Pitts.	0.011	0.056	0.074	0.014	0.006	0.022	0.017	0.021	0.022	0.011	0.012	0.012	0.016	0.012	0.025	0.022	0.009
Boise	0.008	0.056	0.015	0.021	0.010	0.017	0.022	0.026	0.016	0.008	0.009	0.012	0.016	0.012	0.019	0.014	0.006

Tabla 15. Matriz de radios normalizada para MOORA. Fuente: elaboración propia.

Con esto las funciones de agregación obtenidas con la ecuación (6) serían:

Opción	Yi	Lugar
Minneapolis	0.392	1
Seattle	0.341	4
Denver	0.337	6
Boulder	0.350	3
Portland	0.338	5

Austin	0.309	7
Pittsburgh	0.361	2
Boise	0.287	8

Tabla 16. Funciones de agregación y ranking de las opciones con MOORA. Fuente: elaboración propia.

Las 3 mejores ciudades coinciden con las obtenidas con SAW, sólo que ahora Pittsburgh supera a Boulder en la segunda posición y Minneapolis repite como la mejor alternativa.

Si se aplica la metodología TOPSIS, se llega a la matriz normalizada ponderada, la cual se muestra en la tabla 17 y ya incluye en sus dos últimas filas para cada criterio la alternativa ideal I+, así como la antiideal I-.

Criterio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Minn.	0.014	0.045	0.074	0.014	0.016	0.028	0.022	0.021	0.027	0.014	0.015	0.009	0.016	0.012	0.025	0.029	0.012
Seattle	0.014	0.023	0.015	0.034	0.013	0.028	0.028	0.026	0.027	0.014	0.015	0.009	0.012	0.015	0.025	0.029	0.016
Denver	0.011	0.034	0.030	0.027	0.013	0.022	0.028	0.026	0.027	0.014	0.012	0.015	0.008	0.012	0.025	0.022	0.012
Boulder	0.011	0.034	0.030	0.027	0.016	0.028	0.028	0.026	0.027	0.014	0.012	0.015	0.008	0.012	0.025	0.029	0.009
Portland	0.014	0.034	0.015	0.021	0.016	0.028	0.028	0.026	0.027	0.014	0.012	0.012	0.012	0.012	0.025	0.029	0.016
Austin	0.014	0.045	0.030	0.027	0.006	0.017	0.017	0.021	0.016	0.008	0.012	0.015	0.012	0.015	0.025	0.014	0.016
Pitts.	0.011	0.056	0.074	0.014	0.006	0.022	0.017	0.021	0.022	0.011	0.012	0.012	0.016	0.012	0.025	0.022	0.009
Boise	0.008	0.056	0.015	0.021	0.010	0.017	0.022	0.026	0.016	0.008	0.009	0.012	0.016	0.012	0.019	0.014	0.006
I+	0.014	0.056	0.074	0.034	0.016	0.028	0.028	0.026	0.027	0.014	0.015	0.015	0.016	0.015	0.025	0.029	0.016
I-	0.008	0.023	0.015	0.014	0.006	0.017	0.017	0.021	0.016	0.008	0.009	0.009	0.008	0.012	0.019	0.014	0.006

Tabla 17. Matriz normalizada ponderada con TOPSIS. Fuente: elaboración propia.

Luego se calcula para cada opción la distancia ideal y la antiideal, para llegar al índice de similaridad de cada opción, lo que define el ranking con esta metodología.

Opción	D+	Lugar
Minneapolis	0.730	1
Seattle	0.345	7
Denver	0.387	4
Boulder	0.417	3
Portland	0.335	8
Austin	0.385	5
Pittsburgh	0.705	2
Boise	0.352	6

Tabla 18. Índices de Similaridad de cada opción y ranking con TOPSIS. Fuente: elaboración propia.

La clasificación de las 3 primeras ciudades es exactamente igual a la obtenida con MOORA, aun cuando para las ciudades en los lugares del 4 al 8 no coincidan.

Finalmente, al aplicar la metodología ELECTRE, se llega a la siguiente matriz normalizada ponderada:

Criterios	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Minn	0.035	0.080	0.120	0	0.035	0.068	0.034	0	0.068	0.035	0.035	0	0.035	0	0.068	0.068	0.024
Seattle	0.035	0	0	0.068	0.024	0.068	0.068	0.068	0.068	0.035	0.035	0	0.018	0.035	0.068	0.068	0.035
Denver	0.018	0.040	0.030	0.046	0.024	0.034	0.068	0.068	0.068	0.035	0.018	0.035	0	0.000	0.068	0.034	0.024
Boulder	0.018	0.040	0.030	0.046	0.035	0.068	0.068	0.068	0.068	0.035	0.018	0.035	0	0	0.068	0.068	0.012
Portland	0.035	0.040	0	0.023	0.035	0.068	0.068	0.068	0.068	0.035	0.018	0.018	0.018	0	0.068	0.068	0.035
Austin	0.035	0.080	0.030	0.046	0	0	0	0	0	0	0.018	0.035	0.018	0.035	0.068	0	0.035
Pitts	0.018	0.120	0.120	0	0	0.034	0	0	0.034	0.018	0.018	0.018	0.035	0	0.068	0.034	0.012
Boise	0	0.120	0	0.023	0.012	0	0.034	0.068	0	0	0	0.018	0.035	0	0	0	0

Tabla 19. Matriz normalizada ponderada con ELECTRE. Fuente: elaboración propia.

Y la matriz de concordancias es:

Opción	Minneapolis	Seattle	Denver	Boulder	Portland	Austin	Pittsburgh	Boise
Minneapolis		0.5173	0.6386	0.5703	0.5173	0.6799	0.6473	0.6389

Seattle	0.4827		0.5533	0.4674	0.4743	0.6204	0.6557	0.7156
Denver	0.3614	0.4467		0.4317	0.4727	0.5755	0.5698	0.7931
Boulder	0.4297	0.5326	0.5683		0.5587	0.5755	0.6204	0.7931
Portland	0.4828	0.5257	0.5273	0.4413		0.5168	0.6381	0.6815
Austin	0.3201	0.3796	0.4245	0.4245	0.4832		0.3473	0.553
Pittsburgh	0.3527	0.3443	0.4302	0.3796	0.3619	0.6527		0.647
Boise	0.3611	0.2844	0.2069	0.2069	0.3185	0.447	0.353	

Tabla 20. Matriz de Concordancias. Fuente: elaboración propia.

Y la matriz de discordancias:

Opción	Minneapolis	Seattle	Denver	Boulder	Portland	Austin	Pittsburgh	Boise
Minneapolis		0.5706	0.7606	0.7606	0.5706	0.5067	1	0.5706
Seattle	1		1	1	0.8769	1	1	1
Denver	1	0.8847		1	1	0.5842	1	1
Boulder	1	0.8847	0.346		0.7893	0.5842	1	1
Portland	1	1	0.8768	1		0.5842	1	1
Austin	1	0.8559	1	1	1		1	1
Pittsburgh	0.8847	0.5706	0.7606	0.7606	0.5706	0.5067		0.5706
Boise	1	0.5706	0.8559	0.8559	0.8559	1	1	

Tabla 21. Matriz de Discordancias. Fuente: elaboración propia.

Con lo cual, los umbrales de concordancia y discordancia resultan en 0.5 y 0.853, respectivamente.

Con esto, se obtienen las matrices de dominancia concordante y discordante, para llegar finalmente a la matriz de dominancia agregada, la cual es la siguiente:

Opción	Minneapolis	Seattle	Denver	Boulder	Portland	Austin	Pittsburgh	Boise
Minneapolis		1	1	1	1	1	0	1
Seattle	0		0	0	0	0	0	0
Denver	0	0		0	0	1	0	0
Boulder	0	0	1		1	1	0	0
Portland	0	0	0	0		1	0	0
Austin	0	0	0	0	0		0	0
Pittsburgh	0	0	0	0	0	1		1
Boise	0	0	0	0	0	0	0	

Tabla 22. Matriz de dominancia agregada. Fuente: elaboración propia.

Siendo las dominancias:

Opción	Domina a	Dominada por	Diferencia	Ranking
Minneapolis	6	0	6	1
Seattle	0	1	-1	4
Denver	1	2	-1	4
Boulder	3	1	2	2
Portland	1	2	-1	4
Austin	0	5	-5	8
Pittsburgh	2	0	2	2
Boise	0	2	-2	7

Tabla 23. Dominancias de cada opción. Fuente: elaboración propia.

Siendo la mejor ciudad Minneapolis, seguida de Boulder y Pittsburgh, quienes han quedado empatadas en el segundo sitio, resultados similares a los obtenidos con los métodos precedentes.

5. CONCLUSIONES

Al hacer una síntesis de los resultados obtenidos con los 4 métodos, se tiene lo siguiente:

Opción	SAW	MOORA	TOPSIS	ELECTRE
Minneapolis	1	1	1	1
Seattle	4	4	7	4
Denver	6	6	4	4
Boulder	2	3	3	2
Portland	5	5	8	4
Austin	7	7	5	8
Pittsburgh	3	2	2	2
Boise	8	8	6	7

Tabla 24. Síntesis de los resultados con cada método. Fuente: elaboración propia.

Los 4 métodos han coincidido en la mejor ciudad, que ha sido Minneapolis, mientras que, para la segunda y tercera posición, todos los modelos coinciden en que son las ciudades de Pittsburgh, resultante en 3 de los 4 modelos como la segunda mejor ciudad y Boise, que ha obtenido la segunda posición con dos de los modelos y la tercera con los otros dos.

En cuanto a las posiciones del cuarto al octavo sitio, hay diferencias entre los métodos aplicados. No obstante, se concluye que la mejor decisión sería en este caso que la pareja norteamericana elija la ciudad de Minneapolis para residir ahí, a pesar que en algunos de los criterios, fue la ciudad peor evaluada, como fue el caso del clima y el mercado laboral tecnológico.

Precisamente se buscó aplicar modelos multicriterio de diferentes bases metodológicas, para ver si éstos coincidían en la mejor decisión, que para este caso así ha sucedido.

En cuanto al impacto que puede tener una decisión de este tipo, si uno revisa los criterios bajo los cuales se han medido las 8 ciudades norteamericanas, puede observarse que la pareja recién casada toma en cuenta las cuestiones climáticas y de sustentabilidad, lo cual hoy día debe ser una prioridad de las ciudades modernas, además otros aspectos, como las políticas de la ciudad, las industrias, los aspectos culturales, económicos y recreativos y los diversos servicios con que cuentan las ciudades, como son alimentos, transporte y vías de comunicación.

Al haber coincidido los 4 modelos presentados en este estudio, lo cual no siempre sucede, es obvio que la mejor ciudad para que la pareja decida residir en ella es Minneapolis.

Este tipo de modelos de decisión puede aplicarse a una gran variedad de casos diferentes, usuales en las empresas e instituciones de hoy, lo que debe llevar a una mejor toma de decisiones, que repercuta en crear una relación ganar-ganar entre las organizaciones, su personal y el entorno, lo que impactará positivamente en los aspectos sociales, ambientales y económicos.

RECEIVED: MAY, 2023.

REVISED: JULY, 2023-

REFERENCIAS

- [1] BYSTRZANOWSKA, M., PENA-PEREIRA, F., MARCINKOWSKI, Ł., y TOBISZEWSKI, M. (2019) How green are ionic liquids? –A multicriteria decision analysis approach. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 174, 455-458.
- [2] CINELLI, M., KADZINSKI, M., GONZALEZ, M., y SLOWINSKI, R. (2020): How to support the application of multiple criteria decision analysis? Let us start with a comprehensive taxonomy. **Omega**, 96, 102261.
- [3] CINELLI, M., KADZINSKI, M., MIEBS, G., GONZALEZ, M., y SLOWINSKI, R. (2022): Recommending multiple criteria decision analysis methods with a new taxonomy-based decision support system. **European Journal of Operational Research**, 302, 633-651.
- [4] CLEMENTE-SUÁREZ, V. J., NAVARRO-JIMÉNEZ, E., RUISOTO, P., DALAMITROS, A. A., BELTRAN-VELASCO, A. I., HORMEÑO-HOLGADO, A., y TORNERO-AGUILERA, J. F. (2021): Performance of fuzzy multi-criteria decision analysis of emergency system in COVID-19 pandemic. An extensive narrative review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 18, 5208.
- [5] HAMURCU, M., y EREN, T. (2020): Electric bus selection with multicriteria decision analysis for green transportation. **Sustainability**, 12, 2777.

- [6] HANSSON, J., MANSSON, S., BRYNOLF, S., y GRAHN, M. (2019): Alternative marine fuels: Prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders. **Biomass and Bioenergy**, 126, 159-173.
- [7] INAL, O. B., y DENIZ, C. (2020): Assessment of fuel cell types for ships: Based on multi-criteria decision analysis. **Journal of Cleaner Production**, 265, 121734.
- [8] IZAR-LANDETA, J. M. (2022): **Modelos de decisión multicriterio en el ámbito administrativo**. México: Instituto Mexicano de Contadores Públicos.
- [9] JAMWAL, A., AGRAWAL, R., SHARMA, M., y KUMAR, V. (2021): Review on multi-criteria decision analysis in sustainable manufacturing decision making. **International Journal of Sustainable Engineering**, 14(3):, 202-225.
- [10] KARIMI, H., AMIRI, S., HUANG, J., y KARIMI, A. (2019): Integrating GIS and multi-criteria decision analysis for landfill site selection, case study: Javanrood County in Iran. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 16, 7305-7318.
- [11] MARTINS, I. D., MORAES, F. F., TÁVORA, G., SOARES, H. L. F., INFANTE, C. E., ARRUDA, E. F., y LOURENCO, M. I. (2020): A review of the multicriteria decision analysis applied to oil and gas decommissioning problems. **Ocean & Coastal Management**, 184, 105000.
- [12] MOJAVER, M., HASANZADEH, R., AZDAST, T., y PARK, C. B. (2022): Comparative study on air gasification of plastic waste and conventional biomass based on coupling of AHP/TOPSIS multi-criteria decision analysis. **Chemosphere**, 286, 131867.
- [13] NÉMETH, B., MOLNÁR, A., BOZÓKI, S., WIJAYA, K., INOTAI, A., CAMPBELL, J. D., y KALÓ, Z. (2019): Comparison of weighting methods used in multicriteria decision analysis frameworks in healthcare with focus on low-and middle-income countries. **Journal of comparative effectiveness research**, 8, 195-204.
- [14] OLIVEIRA, M. D., MATALOTO, I., y KANAVOS, P. (2019): Multi-criteria decision analysis for health technology assessment: addressing methodological challenges to improve the state of the art. **The European Journal of Health Economics**, 20, 891-918.
- [15] PHAM, B. T., LUU, C., VAN DAO, D., VAN PHON, T., NGUYEN, H. D., VAN LE, H., y PRAKASH, I. (2021): Flood risk assessment using deep learning integrated with multi-criteria decision analysis. **Knowledge-based systems**, 219, 106899.
- [16] RAHMAN, M., NINGSHENG, C., ISLAM, M. M., DEWAN, A., IQBAL, J., WASHAKH, R. M. A., y SHUFENG, T. (2019): Flood susceptibility assessment in Bangladesh using machine learning and multi-criteria decision analysis. **Earth Systems and Environment**, 3, 585-601.
- [17] RUIZ, H. S., SUNARSO, A., IBRAHIM-BATHIS, K., MURTI, S. A., y BUDIARTO, I. (2020): GIS-AHP Multi Criteria Decision Analysis for the optimal location of solar energy plants at Indonesia. **Energy Reports**, 6, 3249-3263.
- [18] SHORABEH, S. N., ARGANY, M., RABIEI, J., FIROZJAEI, H. K., y NEMATOLLAHI, O. (2021): Potential assessment of multi-renewable energy farms establishment using spatial multi-criteria decision analysis: A case study and mapping in Iran. **Journal of Cleaner Production**, 295, 126318.
- [19] SWARD, J. A., NILSON, R. S., KATKAR, V. V., STEDMAN, R. C., KAY, D. L., IFFT, J. E., y ZHANG, K. M. (2021): Integrating social considerations in multicriteria decision analysis for utility-scale solar photovoltaic siting. **Applied energy**, 288, 116543.
- [20] U.S. NEWS & WORLD REPORT (2023):: Best National University Rankings. Disponible en <https://www.usnews.com/best-colleges/rankings/national-universities>. Consulted 1-3. 2023.
- [21] VIEIRA, A. C., OLIVEIRA, M. D., y COSTA, C. A. B. (2020): Enhancing knowledge construction processes within multicriteria decision analysis: The Collaborative Value Modelling framework. **Omega**, 94, 102047.
- [22] VLACHOKOSTAS, Ch; MICHAILEDIOU, A. V.; ACHILLAS, Ch. (2021): Multi-criteria decision analysis towards promoting waste-to-energy management strategies: a critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 138, 110563.
- [23] WALK SCORE (2023):: Live Where You Love. Walk Score APIs. Disponible en <https://www.walkscore.com/>. Consulted 15-3, 2023.
- [24] WANG, Y. M., y LUO, Y. (2009): On Rank reversal in decision analysis. **Mathematical and Computing Modelling**, 49, 1221-1229.