

Algoritmo evolutivo multiobjetivo aplicado a planificación turística de Alto Paraná

Carlos Domingo Almeida Delgado¹ y Pedro Romero Aguirre²

Facultad Politécnica, Universidad Nacional del Este

Ciudad del Este, Paraguay

¹carlosdad@fpune.edu.py ²pedro_romero@fpune.edu.py

Resumen

El propósito del presente trabajo es utilizar un algoritmo evolutivo multiobjetivo para auxiliar en el proceso de planificación de la expansión turística de Alto Paraná, Paraguay. Concretamente, se muestra su aplicación para facilitar la planificación de la regionalización turística de Alto Paraná, utilizando una técnica de inteligencia artificial consistente en un algoritmo evolutivo multiobjetivo que posibilita obtener diversas opciones de solución eficiente, posibilitando evaluar una gran cantidad de posibilidades de manera veloz. La planificación de la expansión turística receptiva de Alto Paraná dispondría de una utilidad para realizar trabajos futuros relacionados al desarrollo turístico. Teniendo en cuenta el problema sanitario mundial relacionado con el coronavirus; este trabajo podría proporcionar los elementos necesarios para una reingeniería y posterior desarrollo del sector, para incentivar el turismo interno en Paraguay. Se ha mostrado que la técnica propuesta es eficiente para resolver este tipo de problema, posibilitando ahorrar significativamente costos de planificación e implementación. Así, este trabajo puede servir como semillero de numerosos trabajos de investigación futuros.

Descriptores: planificación de centros turísticos, optimización multiobjetivo, expansión turística, algoritmo evolutivo, centro turístico, Pareto.

Abstract

The purpose of this paper is to use a multi-objective evolutionary algorithm to assist in the planning process of tourism expansion in Alto Paraná, Paraguay. Specifically, its application is shown to facilitate the planning of the tourism regionalization of Alto Paraná, using an artificial intelligence technique consisting of a multi-objective evolutionary algorithm that makes it possible to obtain several efficient solution options, making it possible to quickly evaluate a large number of possibilities. The planning of the receptive tourism expansion of Alto Paraná would have a reference for future works related to tourism development. Taking into account the world sanitary problem related to the coronavirus; this work would provide the necessary elements for a reengineering and further development of the sector, in order to encourage domestic tourism in Paraguay. It has been shown that the proposed technique is efficient to solve this type of problem, making it possible to significantly save planning and implementation costs. Thus, this work can serve as a seedbed for numerous future research works.

Keywords: resort planning, multi-objective optimization, tourism expansion, evolutionary algorithm, resort, Pareto.

1. Introducción

La ubicación de centros turísticos constituye una tarea importante en la planificación turística. La presente propuesta consiste en emplear una técnica para ubicar centros turísticos en el Departamento Alto Paraná, basándose en datos disponibles tales como población, ubicación de puntos con potencial turístico en un plano cartográfico del Departamento Alto Paraná, distancias entre puntos turísticos, categorización de los atractivos turísti-

cos. Con los datos disponibles, se utilizó un algoritmo evolutivo multiobjetivo para ubicar centros turísticos teniendo en cuenta los objetivos: costo de instalación, costo de transporte, costo de actividades turísticas y valoración de tales actividades. El trabajo incluyó el estudio de caso del Departamento Alto Paraná, donde la actividad turística consiste principalmente en el turismo de compras, quedando en segundo plano algunas otras atrac-

ciones existentes tales como museos, balnearios y parques.

Importancia del tema

El problema de ubicar centros turísticos utilizando la optimización multiobjetivo, es considerado NP-hard, es decir, un problema difícil no resoluble en tiempos polinómicos, ya que envuelve numerosas variables y mucho cálculo que en la práctica es muchas veces una tarea trabajosa.

La elección de este tema fue debido a la escasa literatura que aborda el problema de ubicar centros turísticos, y considerando que el desarrollo turístico receptivo es una asignatura pendiente en el país, este trabajo pretende ser una guía para realizar una buena planificación del turismo, en Alto Paraná.

Objetivos

Objetivo General

Aplicar un algoritmo evolutivo multiobjetivo para ubicar centros turísticos del Departamento Alto Paraná, teniendo en cuenta los criterios: costo de instalación, costo de transporte, costo de actividades turísticas y valoración de tales actividades.

Objetivos Específicos

1. Identificar datos disponibles tales como población, ubicación de puntos con potencial turístico en un plano cartográfico del Departamento Alto Paraná.
2. Calcular la distribución de centros turísticos para una expansión turística receptiva óptima de Alto Paraná con enfoque multiobjetivo, con respecto a los criterios seleccionados.

Antecedentes

Uno de los problemas para los que se consideran soluciones tentativas en América Latina es la organización territorial del espacio en el que se desarrollan las actividades turísticas. La instalación de centros turísticos, constituye una sección importante de la idealización urbana, debido a que constituye el punto de inicio para varios destinos turísticos. En [1] se definen cuatro tipos de centros turísticos: de distribución, de estadía, de escala y de excursión. En la planificación de los centros turísticos, se deben tener en cuenta: el radio de influencia real de automóviles, el radio de influencia teórica de autobuses, el radio de influencia teórica de automóviles, los servicios de alojamiento, alimentación, esparcimiento, las agencias de viajes, los atractivos locales, los comercios turísticos y los sistemas de transporte.

En un trabajo sobre la ciudad Asunción se ha utilizado un método basado en algoritmos evolutivos multiobjetivos para ubicar centrales telefónicas a corto, mediano y largo plazo, de forma a calcular la cantidad de centros necesarios para cubrir la demanda de un área y la correspondiente ubicación eficiente de los mismos, tratando de minimizar los costos, basados en datos de población, demanda de tráfico y costo de la infraestructura requerida para atender la demanda proyectada [2].

En otro trabajo se ha probado calcular la ruta ideal para un turista que decide pasar un tiempo determinado en una zona mediante la formulación de un modelo multiobjetivo, considerando costes económicos, duración de las actividades, y preferencias del turista, mediante el uso de métodos metaheurísticos, los cuales están teniendo un importante auge dada su gran aplicabilidad a problemas de difícil solución por métodos exactos. El trabajo se aplicó en un *tour* por Andalucía, donde el turista conoce los recursos y productos turísticos de sus distintas provincias [3].

En otro abordaje se ha llevado a cabo una programación multiobjetivo de ayuda al turista en la votación de destinos. Se ha desarrollado un instrumento que da al turista un itinerario lo más conveniente de acuerdo a sus necesidades, que incluye las ocupaciones que puede hacer en un horario predeterminado [4].

La zonificación turística propuesta en [1] es una manera de entender el territorio turístico con un abordaje regional. El “Programa de Regionalización del Turismo”, desarrollado por el Ministerio de Turismo brasileño, busca comprender una región, y cómo esta puede colaborar con el proceso de planificación y organización del turismo en determinada localidad. La autovía BR 343, localizada en el estado Piauí (Brasil), promueve la unión entre la capital del estado: Teresina, y el litoral conformando un corredor turístico. De esa forma, a través del abordaje teórico, se demuestra la zonificación de la región turística del centro-norte de Piauí, como aporte a las posibles intervenciones turísticas que se produzcan en esa región, teniendo como elemento de base la oferta turística observada a lo largo de la autovía BR 343 [5].

Otro trabajo recomienda un algoritmo genético (*genetic algorithm*, GA) híbrido para solucionar el problema de localización-enrutamiento dimensionado. El algoritmo planteado sigue el marco estándar de GA usando métodos de búsqueda local en la etapa de mutación. Los resultados que se presentan demuestran que el algoritmo es efectivo, proporcionando resultados competitivos en un tiempo computacional razonable [6].

La ubicación óptima de centros turísticos consiste en disponer los centros en lugares en que se pueda recorrer los puntos turísticos de la for-

ma más eficiente posible. Las técnicas tradicionales de planificación utilizan métodos heurísticos de cálculo para la ubicación adecuada de estos centros turísticos. La utilización de algoritmo evolutivo multiobjetivo para planificar los centros turísticos de Ciudad del Este, teniendo en cuenta los objetivos: costos de instalación, costo de transporte, costo de la actividad y valoración de la actividad; constituye una opción válida en la elaboración de propuestas, teniendo en cuenta la rapidez con que se pueden encontrar soluciones y la variedad y calidad de estas soluciones [7].

El Departamento Alto Paraná, Paraguay; posee atractivos turísticos en sus 22 municipios, los cuales fueron colectados en un trabajo documental [8]. En dicho trabajo se ha encontrado que el patrimonio turístico de la región abarca destinos de relevancia para el turismo receptivo, como la Hidroeléctrica Itaipu, el Monumento Científico Moisés Bertoni y el Parque Nacional Ñacunday. Se encuentran aún etnias nativas que pueden ser visitadas, como son los grupos de la etnia Aché; se puede realizar compras, hay ferias y negocios, eventos y casinos. Se sugiere la instalación de posadas y opciones gastronómicas en las inmediaciones de los atractivos, pues el Departamento presenta déficit en servicios al turista.

2. Método

El presente trabajo posee enfoque principalmente cuantitativo, con un alcance correlacional y el diseño experimental. El enfoque cualitativo consta de datos numéricos para el cálculo de las variables turísticas definidas, según las ejecuciones del algoritmo. El alcance fue correlacional a través de las relaciones entre las variables utilizadas y además, se han expuesto los fundamentos de los resultados obtenidos, explicando según el modelo aplicado, las posibles ubicaciones de centros turísticos encontrados para la regionalización turística en Alto Paraná. La regionalización turística de Alto Paraná depende de las variables definidas: población, costo de traslado, ubicación de los puntos con potencial turístico, costo de las actividades turísticas y tiempo disponible para el viaje, entre otras variables. El diseño del algoritmo fue experimental: mediante las ejecuciones del algoritmo evolutivo multiobjetivo, se pudieron controlar de las variables en cada una de las alternativas de solución posibles. Es decir, se manipularon las ubicaciones de los centros turísticos, y se compararon varias soluciones alcanzadas, en un contexto de optimización multiobjetivo, utilizando el concepto de Pareto.

Lo primero que se realizó fue el cálculo de ubicación de los puntos con potencial turístico de Alto Paraná, y a partir de ahí se han construido las

bases de datos del trabajo. Para la ubicación de los centros turísticos en el Departamento de Alto Paraná fueron utilizados los datos obtenidos a partir de un trabajo de investigación financiado por el CONACYT [8], primeramente se elaboraron las matrices de distancia sobre rutas entre todos los puntos con potencial turístico, así como las matrices de costos de las actividades turísticas, y la de valoración de tales actividades turísticas.

Por lo tanto, para poder realizar la planificación de la expansión turística en Alto Paraná, se realizaron las matrices de datos que posibilitaron calcular la ubicación óptima de los centros turísticos en el Departamento Alto Paraná, teniendo en cuenta los cuatro objetivos del proyecto: minimización de costos de instalación, minimización de costos de transporte, minimización de costos de actividades turísticas, maximización de valoración de las actividades turísticas.

Se definen algunos conceptos relativos a la optimización multiobjetivo, luego se resume el procedimiento realizado para encontrar las soluciones y se presenta el caso de prueba de la técnica propuesta.

2.1. Optimización Multiobjetivo

Matemáticamente, el problema de optimización multiobjetivo tratado en este trabajo se define de la siguiente forma [9, 18]:

Objetivo:

$$y = f(x) = (f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x)) \quad (1)$$

Donde:

Se deben minimizar f_1, f_2, f_3 y maximizar f_4
 $x = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \in X \subset \mathbb{N}^n$ representa el vector de variables de decisión;

$y = (y_1, y_2, y_3, y_4) = f(x) \in Y \subset \mathbb{N}^4$ representa el vector de funciones objetivo;

n : número máximo de centros turísticos;

m : número de puntos turísticos en el Departamento de Alto Paraná;

x_i : designa la ubicación de un centro dentro del área en estudio ($0 \leq x_i \leq m$);

y_i : representa la función objetivo;

X : representa el espacio de decisiones;

Y : representa el espacio objetivo.

Cabe recordar que en un contexto multiobjetivo [9] se dice que un vector objetivo y domina a otro y' si y solo si:

$y_i \leq y'_i, \forall i$, y además $y_j < y'_j$ para al menos un j .

Una solución $x^* \in X$ es Pareto óptima si no hay otra $x \in X$ tal que $y = f(x)$ domine a $y^* = f(x^*)$. El conjunto de todas las soluciones Pareto óptimas es denominado conjunto Pareto óptimo $P(P \subset X)$, y su imagen, frente Pareto $FP(FP \subset Y)$.

2.2. Aplicación de la técnica propuesta

El problema de la ubicación óptima de centros turísticos consiste en encontrar el número óptimo de centros y la mejor ubicación de dichos centros en el área de análisis (típicamente dentro de un área determinada: Alto Paraná, para este trabajo), de forma a minimizar los costos de instalación, transporte y actividades turísticas; y maximizar la valoración de actividades turísticas.

La región tratada constituye el Departamento Alto Paraná con sus 22 municipios. A cada uno de los sitios con potencial turístico se asignó un código, a fin de crear las matrices de costo de terrenos, de distancias entre los sitios, de costos de las actividades turísticas y de valoración de las actividades turísticas.

De esta forma, se obtuvo la matriz de distancias $M \in \mathbb{N}^{m \times 3}$ con tres columnas con información de:

- 1.^a columna: punto del sitio turístico de origen en el mapa;
- 2.^a columna: punto del sitio turístico de destino en el mapa;
- 3.^a columna: distancia en kilómetros entre el origen y el destino (dato utilizado para calcular el costo de transporte).

$$\text{Minimizar } y_1 = \sum_{j=1}^4 C_J(x) \quad (2)$$

Donde:

donde:

$c_1(x)$: costos de terrenos donde serán instalados los centros;

$c_2(x)$: costos de edificios donde serán instalados los centros;

$c_3(x)$: costos de ingeniería que conlleva la instalación de los centros;

$c_4(x)$: costos de equipamientos.

Como problema de aplicación para usar la presente propuesta se escogió diseñar la ubicación más conveniente, de acuerdo con criterios definidos, de centros turísticos en el Departamento Alto Paraná, dada la disponibilidad de datos para tal tarea. La figura 1 representa el Departamento Alto Paraná con los sitios turísticos.

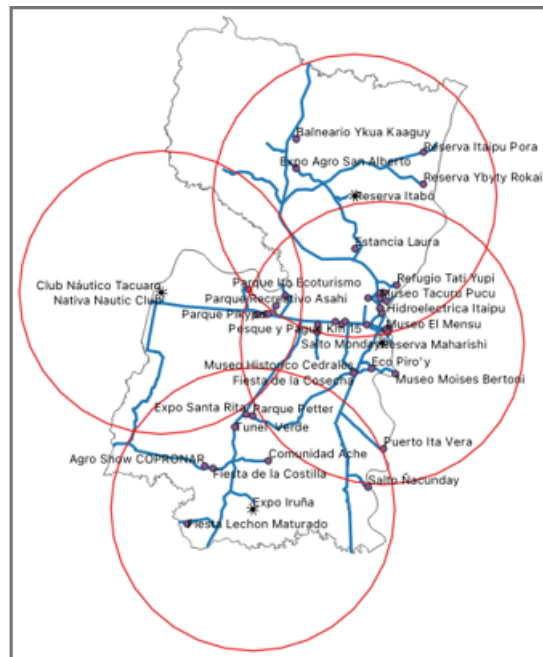


Figura 1. Departamento Alto Paraná con los sitios y sus centros turísticos. Se aprecia un ejemplo de cuatro centros turísticos con sus respectivas zonas de cobertura.

El vector de decisión para este ejemplo, al adoptar un número máximo de $n = 7$ centros, es:

$$x = (0, 0, 0, 0, 5, 9, 12, 43)$$

donde se observa que de los siete centros posibles, esta solución solo utiliza 4 centros, ubicados en las posiciones 5, 9, 12 y 43. Puede notarse además, que el vector de decisión x tiene sus elementos x_i ordenados en forma creciente, lo cual facilita detectar soluciones similares donde los mismos centros se encuentran simplemente permutados.

Los sitios turísticos que forman parte del área de influencia de un centro turístico, son aquellos que tienen el costo mínimo de conexión cuando son conectados a este centro, y que además se encuentran dentro del radio de 50 km de cada centro turístico indicado en el mapa.

El costo del terreno es el producto del costo por m^2 y el área del edificio del centro turístico es conforme a:

$$c_1(x) = \sum_{i=1}^n q_i \cdot g_i \cdot w_i \quad (3)$$

donde:

q_i : área en m^2 a ser ocupada por el centro x_i .
 g_i : costo del terreno por m^2 en la cuadrícula x_i

$$w_i = \begin{cases} 1 & \text{si la central está en } x_i \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Los demás costos de la ecuación 2 se calculan de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} c_2(x) &= \sum_{i=1}^n c_e \cdot w_i \\ c_3(x) &= \sum_{i=1}^n c_{ing} \cdot w_i \\ c_4(x) &= \sum_{i=1}^n c_{eq} \cdot w_i \end{aligned} \quad (4)$$

donde:

c_e : costo de construcción del edificio del centro turístico;

c_{ing} costo de la ingeniería de planificación de centros;

c_{eq} costo de los equipamientos del centro turístico;

$i = 1, 2, 3, \dots, n$.

El segundo objetivo consiste en minimizar el costo de transporte a los puntos turísticos x_t que están en un radio de influencia de un centro turístico, y se realiza conforme a:

$$c_{it} = p \cdot d_{it} \quad (5)$$

donde:

c_{it} : costo de transporte desde el centro turístico x_i a los puntos turísticos x_t ;

p : costo de transporte por kilómetro;

d_{it} : distancia del centro turístico x_i al punto turístico x_t .

El área de cada centro turístico contiene los puntos turísticos que presentan menores distancias a dicho centro, de forma a minimizar el costo de transporte $y_2(x)$. Por lo tanto, el costo total de transporte, para el ejemplo considerado, se calcula conforme a:

$$\text{Minimizar } y_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^m c_{it} \cdot h_{it} \quad (6)$$

donde:

$$h_{it} = \begin{cases} 1 & \text{si el sitio } x_t \text{ está con la central } x_i \\ 0 & \text{en caso contrario.} \end{cases}$$

Se asume que cada sitio x_t puede estar conectado solo a un centro turístico x_i , por lo tanto:

$$\sum_{i=1}^n h_{it} = 1 \quad x_t = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

El tercer objetivo consiste en minimizar el costo de las actividades del turista cuando visita un sitio turístico, se calcula de acuerdo a:

$$\text{Minimizar } y_3(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^m c_t \cdot h_{it} \quad (8)$$

siendo c_t el costo de la actividad t , y h_{it} es una variable binaria que vale 1 cuando se realiza una actividad t partiendo del centro turístico i .

El cuarto objetivo consiste en maximizar la valoración de las actividades del turista y se calcula de acuerdo a:

$$\text{Minimizar } y_4(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^m v_t \cdot h_{it} \quad (9)$$

siendo que v_t es la valoración que se asigna a la actividad t . La valoración de la actividad t del turista, se hace en base a la relevancia y a la preferencia del turista, y en forma pragmática se calcula de la siguiente forma [4]:

$$v_t = w_r \cdot r_t + w_p \cdot p_t \quad (10)$$

donde se denota por r_t la relevancia de la actividad t , por w_r el peso otorgado a la relevancia, por p_t la preferencia del turista por la actividad t , y por w_p su peso. Estos valores son previamente normalizados en una escala de 0 a 10. El valor que cada turista otorga a estos pesos varía en función de sus intereses; sin embargo, para facilitar el proceso de decisión y evitar saturar al turista con demasiadas cuestiones, se considera en general un valor igual a 50 % para cada uno en el caso de alojamientos y restaurantes. En el caso de las visitas se considera un peso igual a 30 % para la relevancia y 70 % para las preferencias debido a que la diversidad existente dentro de este grupo de actividades implica que las preferencias del turista deban ser tomadas en consideración con más fuerza. Para los demás casos, que no impliquen alojamientos, restaurantes y visitas, se considera un peso igual a 80 % para las relevancias y 20 % para las preferencias [7].

Por ende, el problema principal a ser resuelto consiste en encontrar la cantidad de centros turísticos y la ubicación óptima de estos centros en el área considerada, de la cual se conocen todos los datos relativos a la matriz M arriba definida. Si hay m sitios posibles, claramente existen 2^m alternativas de ubicación de centro. Aún si se restringe la atención para ubicar n centros turísticos en m sitios, el número de alternativas de ubicación de centros es todavía:

$$\binom{m}{n} = \frac{m!}{(m-n)!n!} \quad (11)$$

En el ejemplo de la figura 1, para 52 sitios turísticos y siete centros, hay unas $1,34 \times 10^8$ alternativas de ubicación de centros.

El problema propuesto en el presente trabajo posibilita encontrar soluciones Pareto que cumplan con los cuatro objetivos propuestos: 1) minimizar costo de instalación, 2) minimizar costo de transporte desde centros turísticos a sitios turísticos, 3) minimizar costo de actividades turísticas

y 4) maximizar valoración de actividades turísticas del área considerada, de un conjunto de alternativas de ubicación de centros, considerando diferentes valores posibles del número k de centros ($k \leq n$). El espacio de búsqueda del problema propuesto, es entonces:

$$\sum_{i=1}^n \binom{m}{i} \quad (12)$$

en otras palabras, el método utilizado en el presente trabajo debe posibilitar obtener un conjunto de soluciones Pareto óptimas, definiendo la cantidad y la ubicación óptima de estos centros.

2.3. Algoritmo evolutivo empleado

La técnica de optimización aplicada se denomina SPEA2, se trata de un algoritmo evolutivo cuyo resultado consiste en obtener diversas soluciones Pareto óptimas situadas sobre una curva denominada frente Pareto [10].

Este algoritmo utiliza una estrategia de asignación de ajuste (*fitness*) que incorpora información de densidad a fin de evitar pérdida de posibles soluciones óptimas [11]. El operador de truncamiento elimina aquellos individuos que están muy pegados unos a otros de forma a evitar perder puntos valiosos de la frontera y asegurar de esta forma que las soluciones encontradas en el frente Pareto sean regularmente distribuidas.

El proceso de encontrar individuos (soluciones) no dominados en el archivo y la población, está basado en el concepto “dominancia Pareto”. Cada vez que un individuo no dominado es encontrado, el mismo es comparado con los no dominados que ya hay en el archivo y si es una solución, es insertado en el archivo.

En la tabla 1 se ha hecho una comparación de la técnica empleada con otras técnicas similares, describiendo sus ventajas y desventajas mutuamente comparadas.

Tabla 1. Comparación del algoritmo SPEA2 con técnicas alternativas de optimización aplicadas a estudios de caso.

Ítem	Aplicación	Técnica	Ventajas	Desventajas
1	Planificación de viajes con preferencias difusas, diseño de ruta turística (TTDP) [12].	Programación lineal difusa con metaheurística GRASP	Facilidad de agregar nuevos sitios, conjunto de soluciones diferentes	Es mono-objetivo.
2	Evaluación multicriterio de destinos turísticos, para evaluar la competitividad [13].	Optimización multiobjetivo ELECTRE III - NSGA	Es multiobjetivo, permite analizar muchos puntos de interés	Necesita juicio de experto para asignar los pesos
3	Ubicación de facilidades en un entorno competitivo [14]	Interval Branch & Bound, Algoritmo de ubicación Weiszfeld.	Posibilita analizar varias alternativas de facilidades	Es mono-objetivo, se centra en el análisis de 2 competidores.
4	Algoritmo de ubicación-enrutamiento capacitado [6]	Utilización de algoritmo genético híbrido	Disponibilidad de software y base de datos de pruebas	Es mono-objetivo.
5	Expansión turística en Alto Paraná bajo un enfoque multiobjetivo (solución propuesta)	Utilización de algoritmo evolutivo multiobjetivo SPEA2	Es multiobjetivo, provee la mayor cantidad de soluciones posibles, posibilita obtener soluciones no dominadas	Requiere cargar las matrices de distancia entre los puntos y las preferencias.

En los siguientes apartados se describen detalles procedimentales del algoritmo SPEA2 aplicado a la planificación turística de Alto Paraná.

Representación de soluciones, población inicial y fitness

Para la aplicación de los Algoritmos Evolutivos Multiobjetivos propuestos en el problema de prueba, cada individuo $x = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$ fue codificado usando un arreglo de números enteros x_i , tal que $0 \leq x_i \leq m$ ($m=52$).

En la figura 1 se representan los puntos turísticos del Departamento Alto Paraná, que fueron considerados para calcular costos de cada vector de decisión. La población inicial, cuyo tamaño se denota como $nind$ (número de individuos), es generada aleatoriamente, y $nmax$ indica el número máximo de centros para cada vector de decisión.

Se define *fitness* como la capacidad que posee el individuo de adaptarse al ambiente en que se desenvuelve, y determina la probabilidad de cruzamiento y supervivencia de dicho individuo [15].

En la evaluación de la función *fitness* se han empleado conceptos de dominancia Pareto definidos en la sección 2.1., en un contexto de minimización de tres funciones objetivos y maximización de una función objetivo. Cada vector de decisión es comparado con los demás a través de sus respectivas funciones objetivos, de forma a detectar si un individuo i domina a otro individuo j .

La función *fitness* fue implementada conforme a lo especificado por el SPEA2 de Zitzler [11].

Los valores de *fitness* calculados mediante esta función, son utilizados en la selección de los individuos que pasarán a formar parte del archivo que contiene a los mejores individuos de la población. El referido algoritmo asigna a los individuos no dominados una *fitness* menor a 1, en cuanto que a los individuos dominados se les asigna una *fitness* mayor o igual a 1, con lo que todos los individuos tienen diferentes valores de *fitness*. Los individuos que tienen mejor *fitness* (menor que uno) son los que tienen mayor probabilidad de cruzamiento. El algoritmo de *fitness* utilizado para la implementación del algoritmo evolutivo multiobjetivo SPEA2, se detalla en el pseudocódigo 1 mostrado a continuación.

Pseudocódigo 1. Función *fitness* (calcula *fitness* de la población y en archivo)

Hacer N =número de individuos en la población y el archivo

Para $i=1$ hasta N

Para cada individuo i calcular su *strength* $S(i)$, número de soluciones que i domina:

$$S(i) = |\{j \mid j \in P_t + \bar{P}_t \wedge i \succ j\}|$$

Fin Para

Para $i=1$ hasta N

Para cada individuo i calcular el valor de su *raw fitness*, suma de los *strengths* de los individuos que dominan a i :

$$R(i) = \sum S(j)$$

$$j \in P_t + \bar{P}_t, j > i$$

Fin Para

k =raíz cuadrada de N

Para $i=1$ hasta N

Para $j=1$ hasta N

Calcular distancia euclidiana del individuo i a todos los individuos j

Fin Para

Ordenar las distancias del individuo i a todos los individuos j en orden ascendente

Hacer σ_i^k =distancia del individuo i al k -ésimo elemento

Calcular la densidad $D(i)$ del individuo i :

$$D(i) = \frac{1}{\sigma_i^k + 2}$$

Fin Para

Calcular *fitness*=suma de *raw fitness* y densidad:

$$F(i) = R(i) + D(i)$$

Fin

Selección

Se denomina como selección del ambiente [11] a la acción de completar con los mejores individuos de cada generación, una población externa denominada archivo. El tamaño del archivo es fijo; no varía durante las ejecuciones del algoritmo. Inicialmente, todos los individuos no dominados, cuyos *fitness* son menores que uno, son copiados al archivo de la siguiente generación $\bar{P}_{t+1} = \{i \mid i \in P_t + \bar{P}_t \wedge F(i) < 1\}$. Si la cantidad de individuos no dominados es igual al tamaño definido para dicho archivo ($|\bar{P}_{t+1}| = \bar{N}$), el proceso de *selección del ambiente* está completo. En caso contrario, hay dos posibilidades:

1. La cantidad de individuos no dominados es menor que el tamaño definido para el archivo ($|\bar{P}_{t+1}| < \bar{N}$), o
2. La cantidad de no dominados es mayor que el tamaño fijado para el archivo ($|\bar{P}_{t+1}| > \bar{N}$).

En el primer caso, el archivo se completa con los mejores ($\bar{N} - |\bar{P}_{t+1}|$) individuos dominados en el archivo y la población de la generación anterior t . Esto es implementado ordenando el multiconjunto $P_t + \bar{P}_t$ de acuerdo a los valores de *fitness* y copiando a \bar{P}_{t+1} los primeros $\bar{N} - |\bar{P}_{t+1}|$ individuos i con *fitness* $F(i) \geq 1$. En el segundo caso, cuando el tamaño del conjunto de no dominados es mayor que \bar{N} , un operador de truncamiento remueve iterativamente los individuos de $|\bar{P}_{t+1}|$ hasta que el conjunto de no dominados sea igual al tamaño definido para el archivo ($|\bar{P}_{t+1}| = \bar{N}$). Este operador de truncamiento garantiza que puntos valiosos de la frontera no se pierdan, y lo realiza de la siguiente forma: el individuo que tiene la menor distancia euclidiana a otro individuo es desechado en cada iteración. En caso de igualdad con otros individuos, se desempata considerando la segunda menor distancia del individuo a ser removido, y así sucesivamente.

Pseudocódigo 2. Algoritmo evolutivo SPEA2 implementado

Leer los parámetros del SPEA2: $nind$, $nmax$, $ngen$, pm , pc , $nprue$

Generar población usando el algoritmo heurístico (Pseudocódigo 1)
 Generar archivo vacío (conjunto externo)
 Para $gen=1$ hasta $ngen$
 Eliminar centrales repetidas del individuo
 Evaluar funciones objetivo de cada individuo de la población
 Asignar $fitness$ a cada individuo de la población y del archivo
 Calcular todos los individuos no dominados de la población y del archivo
 Actualizar el archivo con los individuos no dominados
 Si el tamaño del archivo es mayor que $nptrue$
 Reducir tamaño del archivo con el operador de truncamiento
 En caso contrario
 Si el tamaño del archivo es menor que $nptrue$
 Copiar los mejores individuos dominados del archivo y la población con $fitness \geq 1$ al archivo de la nueva generación hasta que el tamaño del archivo sea igual a $nptrue$
 Fin si
 Si gen es menor que $ngen$
 Realizar torneo binario para seleccionar individuos del archivo que formarán parte del conjunto de emparejamientos
 Realizar cruzamiento y mutación del conjunto de emparejamientos
 Actualizar la población del resultado del conjunto de emparejamientos
 Fin si
 Incrementar contador de generaciones ($gen=gen+1$)
 Fin Para
 Guardar archivo (conjunto de no dominados)
 Fin

Parámetros del algoritmo SPEA2:

- Tamaño de la población ($nind$) = 100.
- Número máximo de centros ($nmax$) = 1 a 7.
- Tamaño del archivo de no dominados ($nptrue$) = 100.
- Número máximo de generaciones ($ngen$) = 300 a 1500.
- Probabilidad de cruzamiento (pc) = 0,7 a 0,9.
- Probabilidad de mutación (pm) = 0,01 a 0,05.

Los parámetros utilizados en las ejecuciones del algoritmo SPEA2 fueron definidos considerando los resultados experimentales obtenidos en métricas de desempeño para evaluar algoritmos evolutivos multiobjetivos [9, 10]. Se han tenido en

cuenta además, los resultados obtenidos en numerosas ejecuciones del algoritmo, a fin de estimar los mejores parámetros para cada una de las situaciones planteadas en el problema de prueba.

Siempre es posible obtener buenos resultados utilizando valores adecuados de los parámetros del SPEA2 tales como número máximo de generaciones, número máximo de centros, probabilidad de cruzamiento y mutación. Los parámetros definidos precedentemente son los que produjeron mejor resultado.

3. Resultados

Las soluciones obtenidas con el algoritmo SPEA2 fueron evaluadas teniendo en cuenta el concepto de dominancia Pareto, a fin de encontrar las soluciones realmente no dominadas en relación con el conjunto de soluciones encontradas durante todas las ejecuciones realizadas. En la tabla 2 son presentadas las soluciones no dominadas encontradas para el caso de la aplicación al problema de encontrar centros turísticos de Alto Paraná. En la misma están resumidas todas las soluciones que forman parte del frente Pareto, y refleja el resultado de numerosas ejecuciones para obtener mejores soluciones, teniendo en cuenta todos los objetivos formulados para la aplicación de prueba.

En la tabla 1 se muestran algunas soluciones no dominadas para 1, 2, 3 y 4 centros turísticos. La solución número 21, resaltada en la tabla, ubica los centros turísticos en las posiciones 5, 9, 12 y 43, lo cual se grafica en la figura 1. Claramente, los cuatro objetivos: costo de instalación, costo de transporte, costo de actividades y valoración de actividades, conflictúan entre sí por lo que el planificador debe decidir cuál es la mejor relación de compromiso entre los cuatro objetivos considerados. Conviene tener en cuenta que al utilizar este algoritmo evolutivo multiobjetivo, el planificador obtiene las mejores soluciones para cada objetivo, además de toda la gama de soluciones de compromiso Pareto óptimas entre los objetivos, lo cual facilita la toma de decisión consciente.

En el procedimiento descrito, el planificador puede elegir una de las soluciones no dominadas encontradas en la tabla 2 y enfatizar un solo objetivo. Por ejemplo, puede elegir la solución número 25 en donde el costo de instalación es elevado, pero se obtienen costos relativamente menores en transporte a puntos turísticos, costos relativamente menores en actividades, y se logra una buena valoración de las actividades a ser desarrolladas.

Tabla 2. Soluciones no dominadas para ubicar centros turísticos de Alto Paraná.

Solución	Centros turísticos							Costo en US\$			Objetivo 4 Valoración de actividad
								Objetivo 1 Costo de instalación	Objetivo 2 Costo de transporte	Objetivo 3 costo de actividades	
1	0	0	0	0	0	0	40	210000	477,17	51187,10	392,30
2	0	0	0	0	0	0	10	213000	396,58	42881,26	407,80
3	0	0	0	0	0	0	20	231000	267,25	29109,54	426,89
4	0	0	0	0	0	0	50	277000	258,90	27923,41	427,67
5	0	0	0	0	0	44	47	340000	233,04	25915,57	434,15
6	0	0	0	0	0	12	20	341000	198,83	20702,39	434,98
7	0	0	0	0	0	12	26	387000	195,67	20281,78	435,32
8	0	0	0	0	0	20	34	410000	191,53	19437,31	436,49
9	0	0	0	0	9	12	44	450000	174,61	18729,54	441,02
10	0	0	0	0	2	12	20	454000	171,42	17591,99	440,65
11	0	0	0	0	11	12	20	461000	166,65	16884,18	441,26
12	0	0	0	0	11	12	37	470000	169,67	16634,85	440,33
13	0	0	0	0	12	24	39	481000	162,89	16927,77	440,72
14	0	0	0	0	12	44	50	497000	161,87	17066,58	442,72
15	0	0	0	0	11	12	50	507000	157,01	15642,47	442,63
16	0	0	0	0	20	34	44	520000	164,20	17043,20	442,86
17	0	0	0	0	11	20	34	530000	159,34	15619,09	442,77
18	0	0	0	0	11	34	37	539000	163,93	15577,70	441,62
19	0	0	0	0	12	26	35	552000	156,22	16724,37	441,61
20	0	0	0	9	12	31	44	560000	149,58	15862,51	445,02
21	0	0	0	5	9	12	43	565000	145,41	15037,73	444,68
22	0	0	0	11	12	20	31	571000	141,79	14032,91	445,23
23	0	0	0	12	39	44	47	590000	138,77	14987,49	446,61
24	0	0	0	2	12	20	39	594000	135,80	13857,43	446,17
25	0	0	0	11	12	20	39	601000	131,03	13149,61	446,79

Dado que en el método propuesto hay varias soluciones no dominadas entre sí, y a fin de simplificar la tarea del planificador, en la figura 2 se presenta una sugerencia pragmática para elegir una de entre todas las soluciones Pareto óptimas. En dicha figura se presenta un gráfico de valoración de actividades versus costo de instalación, en donde las alternativas con menor costo de instalación resultan en una simplificación pragmática a fin de elegir una solución que minimice la cantidad de centros y al mismo tiempo se tenga satisfactoria valoración de actividades. Esta sugerencia se dis-

tingue de una solución del problema por método mono-objetivo en que aquí se propone optimizar todos los parámetros simultáneamente: cantidad óptima de centros turísticos, ubicación óptima de centros para poder minimizar costos de instalación, minimización de costos de transporte a sitios turísticos y minimización de costos de actividades turísticas. Además estas soluciones son para el caso particular de aplicación de prueba, y es imposible generalizarlas a otros casos mucho más complejos.

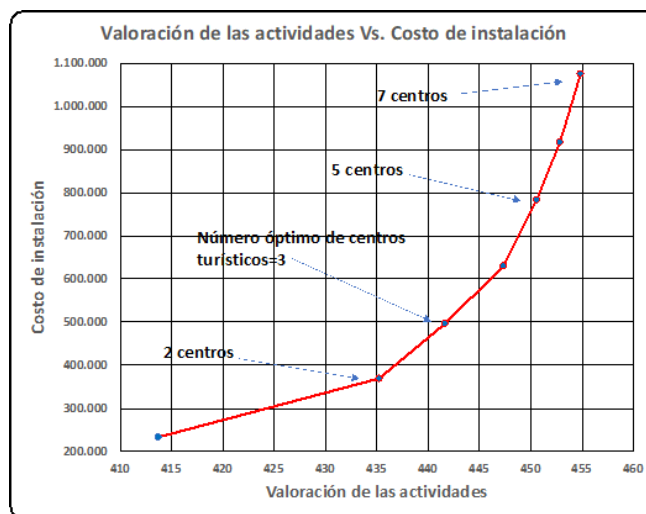


Figura 2. Valoración de actividades versus costo de instalación, para varias cantidades de centros turísticos.

4. Conclusión

El empleo de algoritmo evolutivo multiobjetivo para resolver el problema de ubicar centros turísticos constituye un enfoque diferente en la planificación de ubicación de estos centros. Esta técnica proporciona un recurso computacional que posibilita obtener un conjunto de soluciones Pareto óptimas, considerando todos los aspectos que se quieran optimizar de manera simultánea. Los métodos heurísticos tradicionales proporcionan simplemente soluciones puntuales [16], apelando a procesos iterativos para abarcar todos los aspectos de la red que se quiere diseñar, con la consecuente demora.

En el presente trabajo, se nota que la utilización del algoritmo evolutivo multiobjetivo SPEA2, proporciona al planificador de centros turísticos, un conjunto de soluciones Pareto óptimas para una satisfactoria ubicación de los centros, de forma a minimizar los costos de instalación, de transporte y de actividades, y a maximizar la valoración de las actividades turísticas. Conforme a la naturaleza de la técnica empleada y con los resultados obtenidos en este trabajo, se puede aseverar que las soluciones distribuidas sobre el frente Pareto son no dominadas.

En definitiva, se puede afirmar que el empleo de este algoritmo evolutivo multiobjetivo para planificar, dimensionar y optimizar las ubicaciones de centros turísticos, ofrece una perspectiva más amplia y eficiente que posibilita facilitar a los planificadores decidir entre un conjunto de soluciones óptimas, manejando los diversos aspectos de la planificación turística que se consideren necesarios para optimizar los objetivos propuestos.

Cabe destacar que el método empleado es fácilmente adaptable a la ubicación de centros turísticos de otros espacios geográficos, particularmente, a nivel país.

Sugerencia de temas para futuros trabajos: en base a los resultados obtenidos, se puede generalizar la aplicación del método propuesto para: mejorar la planificación de redes de telecomunicaciones, la ubicación de estaciones bases para telefonía celular, y en general, para ubicar de manera óptima centros de diversos servicios (cadenas de comida rápida, supermercados, y similares).

Referencias bibliográficas

- [1] R. C. Boullón, "Planificación del espacio turístico". 3a ed. México: Trillas, 1997. Obtenido de http://www.aptae.pe/archivos_up/0107-planificacion-del-espacio-turistico-roberto-c-ballon.pdf
- [2] C. Almeida, N. Amarilla y B. Barán, "Optimización Multiobjetivo en la Planificación de Centrales Telefónicas", 2003.
- [3] R. Caballero, M. González, J. Molina, A. Peláez y B. Rodríguez, "PLANIFICACIÓN DE RUTAS TURÍSTICAS BAJO UN ENFOQUE MULTICRITERIO", 1-8, 2005.
- [4] B. Rodríguez, y R. Caballero, "SISTEMA DE AYUDA AL TURISTA. Modelo para la planificación de un viaje personalizado". *Estudios y Perspectivas en Turismo*, 21, 2012, pp. 108-125.
- [5] R. G. Ramos y W. G. Reis, "ZONIFICACIÓN TURÍSTICA DE LA REGIÓN CENTRO-NORTE DEL ESTADO DE PIAUÍ (BRASIL) Aplicación de la teoría del espacio turístico de Roberto Boullón". *Estudios y Perspectivas en Turismo*, 21(2), 2012, pp. 417-435. Obtenido de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1851-17322012000200009&script=sci_arttext
- [6] R. B. Lopes, C. Ferreira y B. S. Santos, "A simple and effective evolutionary algorithm for the capacitated location-routing problem". *Computers and Operation Research*, 70, 2016, pp. 155-162. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.01.006>
- [7] C. D. Almeida, "Planificación de centros turísticos en Ciudad del Este bajo un enfoque multiobjetivo". CONAHSI, 2018.
- [8] J. Venturi, P. Romero, C. D. Almeida y J. S. Delgado. "Diagnóstico del turismo en Alto Paraná y propuestas de desarrollo". Facultad Politécnica-UNE, Ciudad del Este, 2019.
- [9] J. Arroyo y V. Armentano, "Um Algoritmo Genético para Problemas de Otimização Combinatória Multiobjetivo". XXXIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2001.
- [10] V. Khare. "Performance Scaling of Multi-Objective Evolutionary Algorithms". School of Computer Science, 2002.
- [11] E. Zitzler, M. Laumanns y L. Thiele. "SPEA2: Improving The Strength Pareto Evolutionary Algorithms". Technical Report 103, Computer Engineering and Networks Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology, 2001.
- [12] J. Brito, A. Expósito y J. A. Moreno. "Planificación de viajes Turísticos con preferencias y restricciones difusas", 38(2), 2017, pp. 122-131.
- [13] M. León y J. C. Leyva. "Una ayuda de decisión multicriterio para evaluar la competitividad de los destinos turísticos", xxi, 2017, pp. 51-67.
- [14] J. Fernández, S. Salhi y B. G. -Tóth. "Location equilibria for a continuous competitive facility location problem under

- delivered pricing”. *Computers and Operations Research*, 41(1), 2014, pp.185-195. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.08.004>
- [15] D. Goldberg. “Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning”. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- [16] T. Fried, & UIT. “Proceso de planificación iterativo”. PLANITU - Doc - 39s, 1998.
- [17] B. Barán y S. Duarte. “Multiobjective Network Design Optimization using Parallel Evolutionary Algorithms”. Centro Nacional de Computación, Universidad Nacional de Asunción, 2002.