



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Colombia

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA, BOGOTÁ D.C.

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

ÉNFASIS EN GESTIÓN DE PROYECTOS Y CONSTRUCCIÓN

OPTIMIZACIÓN EN EL PLANTEAMIENTO DE LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES TEMPORALES EN OBRAS DE EDIFICACIÓN MEDIANTE EL USO DE ALGORITMO BASADO EN ENJAMBRE DE PARTÍCULAS

PRESENTADO POR

María Camila Ortiz Sánchez, IC

Adriana Marcela Vizcaino Cagüeño, IC

DIRECTOR ACADÉMICO

Jesús Daniel Villalba Morales, DSc

CODIRECTOR

William Villamizar, MSc

BOGOTÁ

2019

HIPÓTESIS

La metodología propuesta al aplicarse en los casos de ubicación de instalaciones (layout de obra) predeterminadas y no predeterminadas, permite obtener soluciones de mejor calidad en términos de distancia entre instalaciones, la cual es medida a partir de las trayectorias del transporte de equipos y/o material (costo-tiempo) y una mejor convergencia medida en número de iteraciones.

Lo anterior se logra teniendo en cuenta que la modificación de la distancia entre las instalaciones implica un impacto y modificación de los valores de costo y tiempo ya que existe una relación entre las variables. Adicionalmente, la convergencia en la búsqueda de la respuesta óptima resulta ser un indicador de la calidad de la metodología implementada.

OBJETIVOS

General

Desarrollar una herramienta computacional para la ubicación óptima de instalaciones en proyectos de construcción de edificaciones (Layout de obra) basada en el algoritmo PSO.

Específico

- Formular el problema de localización óptima de instalaciones de obras de edificación para los casos de ubicaciones predeterminadas y no predeterminadas en términos de las variables de diseño, parámetros de diseño, función objetivo y restricciones
- Configurar el algoritmo basado en cúmulo de partículas (PSO) al problema de la distribución de espacios para ubicaciones predeterminadas y no predeterminadas.
- Comparar el desempeño del algoritmo en términos de la función objetivo y la convergencia con respecto a 5 ejemplos tomados de la literatura.

CONTENIDO

	<u>Pág.</u>
HIPÓTESIS.....	2
OBJETIVOS	2
General	2
Específico.....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. DISEÑO DE LAYOUT DE OBRA.....	6
2.1 Ubicaciones predeterminadas (número de ubicaciones igual a número de instalaciones).....	7
2.2 Ubicaciones predeterminadas (número de ubicaciones mayor a número de instalaciones).....	8
2.3 Ubicaciones no predeterminadas.....	9
3. PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO).....	9
3.1 Características del PSO.....	10
3.2 Función velocidad y actualización de posición.....	10
4. TIPOS DE PROBLEMAS DE LAYOUT ANALIZADOS	12
4.1 Modelo matemático para el problema de ubicaciones predeterminadas (Número de ubicaciones igual a número de instalaciones).....	13
4.2 Modelo matemático para el problema de ubicaciones predeterminadas (Número de ubicaciones mayor a número de instalaciones).....	14
4.3 Modelo matemático para el problema de ubicaciones no predeterminadas.....	16
4.4 Herramienta computacional para la solución de los casos estudiados.....	16
5. EJEMPLOS NUMÉRICOS SELECCIONADOS.....	17
5.1 Ejemplo numérico ubicaciones predeterminadas (Número de ubicaciones igual a número de instalaciones) (Gholizadeh et al., 2010) (Zhang & Wang, 2008).....	17
5.2 Ejemplo numérico ubicaciones predeterminadas (Número de ubicaciones mayor a número de instalaciones) (Lam et al., 2007).....	23
5.3 Ejemplo numérico ubicaciones no predeterminadas (Osman et al., 2003).....	26
6. RESULTADOS.....	29
6.1 Ubicaciones predeterminadas. Número de ubicaciones igual a número de instalaciones.....	29
6.2 Ubicaciones predeterminadas. Número de ubicaciones mayor a número de instalaciones.....	37
6.3 Ubicaciones no predeterminadas	44
7. DISCUSIONES.....	49
8. CONCLUSIONES.....	52
9. ANEXOS.....	53
Referencias.....	54

1. INTRODUCCIÓN

Se conoce como un diseño de sitio de construcción a la actividad que establece la ubicación en la obra de un número predefinido de instalaciones temporales, las cuales pueden variar según el tamaño, el entorno, el acceso, la ubicación, entre otros factores. Dependiendo de la complejidad de la obra, puede existir un gran número de posibilidades (combinaciones) para distribuir espacialmente las instalaciones. En ese sentido, un diseño de sitio apropiado puede aumentar la eficacia y la eficiencia del trabajo de construcción dado que se busca disminuir los tiempos de viaje, eliminar movimientos innecesarios de recursos y reducir factores de riesgo en el manejo o desplazamiento de materiales y/o maquinaria al interior de una obra (Lam et al., 2007).

En el sector de la construcción, la distribución de instalaciones temporales es una actividad que se ha llevado a cabo a través de los años a partir de un juicio humano, basado en la experiencia y el sentido común (Cheng et al., 1996), esta distribución generalmente se da sin una base teórica o numérica, lo que da lugar a asignación de espacios no planificados que dan pérdidas de productividad e incidentes relacionados con la seguridad (Sadeghpour, Moselhi, & Alkass, 2006). Por tanto, teniendo en cuenta la relevancia de una acertada distribución inicial dentro del proceso constructivo, en los últimos 30 años los algoritmos aproximados han despertado un gran interés por parte de la comunidad internacional, por su efectividad y versatilidad las cuales han permitido obtener mejores soluciones (García Nieto, 2006) para este y otros problemas de las diferentes áreas de conocimiento de la ingeniería civil.

En la literatura se observan muchos trabajos donde se busca realizar procesos automáticos para asignar instalaciones temporales dentro de un proyecto de construcción. Entre los primeros trabajos encontramos el presentado por (Tommelein, Levitt, & Hayes-Roth, 1992) donde hace uso de una herramienta como la simulación para la planificación del diseño del sitio de construcción, su trabajo incluye el diseño asistido por computadora, la planificación, la programación, la simulación y la visualización de los procesos de construcción, y el uso de la tecnología de la información.

Igualmente, se han desarrollado gran variedad de algoritmos heurísticos para generar soluciones a los problemas de diseño de sitio de construcción; como es el caso del uso del algoritmo genético para tratar problemas de diseño de área desigual, como en la investigación presentada por (Li & Love, 1998), así mismos autores como (Mawdesley, Al-jibouri, & Yang, 2002) y (Wang, Hu, & Ku, 2005), han hecho uso dentro de sus investigaciones del algoritmo genético, de tal manera que les permite resolver problemas de diseño de sitio, evaluando criterios de manejo de materiales y utilización de superficies.

Así mismo, existen diferentes características para el problema en función teniendo en cuenta aspectos como el de implementar un método de optimización con algoritmo genético para encontrar soluciones casi óptimas para la disposición de material de construcción prediciendo tiempos de transporte de material como es el caso de la investigación hecha por (Pejman Alanjari, SeyedReza Razavi Alavi, Simaa AbouRizk, 2014), igualmente

investigadores como (Farmakis & Chassiakos, 2017), quien desarrolla optimización de espacios en instalaciones temporales de construcción de carreteras teniendo en cuenta aspectos como la proximidad o lejanía de determinadas instalaciones o áreas de trabajo para realizar el diseño de sitio de una obra.

Una vez identificada la necesidad de optimización en el diseño de layout, se debe evaluar la metaheurística a elegir, partiendo del teorema “NO FREE LUNCH”, en el cual se menciona que no existe una única metaheurística capaz de solucionar todos los problemas de optimización, y por consiguiente ninguna de ellas puede considerarse mejor que otra (Wolpert & Macready, 1997). A partir de lo anterior, y basados en la revisión literaria ha sido posible identificar que el algoritmo PSO o basado en enjambre partículas puede lograr un mejor diseño de layout en comparación de otros algoritmos como el ABC y SOS (Prayogo, Sutanto, Suryo, & Eric, 2018). Adicionalmente, el mínimo global se alcanza siempre en el caso de los algoritmos de PSO y ABC para problemas de dimensiones pequeñas (Prayogo, Sutanto, Suryo, & Eric, 2018). Por consiguiente, en el caso del proyecto investigativo se seleccionó la metaheurística PSO o basada en enjambre de partículas como herramienta de optimización de diseño de layout.

Para realizar un análisis de optimización en el planteamiento de las localizaciones temporales es necesario identificar dos tipos de ubicaciones posibles a desarrollar. La primera de ellas son las ubicaciones predeterminadas, en la que se manejan una serie de espacios o celdas en el área total del proyecto, sobre las cuales se sitúan las instalaciones. En este tipo de ubicaciones es posible evidenciar dos situaciones, que se presente un número de celdas (ubicaciones) igual al número de instalaciones o número de celdas disponibles mayor al número de instalaciones. La segunda ubicación posible es la no predeterminada, la cual, visualiza el área del proyecto como una cuadrícula o plano cartesiano, que asigna las instalaciones a partir de coordenadas.

En el presente proyecto de investigación, se busca implementar el algoritmo PSO o basado en enjambre de partículas como herramienta metaheurística que permita realizar un análisis de optimización para seis (6) ejemplos de la literatura (2 ejemplos de ubicaciones no predeterminadas, 4 para predeterminadas caso 1 y 2), y así, a partir de los diferentes datos arrojados por el problema en cuestión como son, la función objetivo, las variables, parámetros de diseño y restricciones, proponer una alternativa sobre una posible asignación de instalaciones que puede ser para algunos o todos los casos una mejor solución medida en número de iteraciones o convergencia. De acuerdo con lo anterior, el siguiente documento posee una estructura donde se evidencia el estado del arte, la metodología implementada y el estudio de caso, el modelo matemático de optimización, programación del algoritmo, resultados y conclusiones.

2. DISEÑO DE LAYOUT DE OBRA

El layout de obra o asignación de instalaciones temporales consiste en la integración de las diferentes áreas funcionales de un proyecto, lo cual implica no solo las áreas internas, sino demás espacios o instalaciones externas que conforman la obra civil. Para realizar un correcto diseño de layout se requiere establecer un listado de las áreas principales del proyecto como son sanitarios, oficinas, zona de acopio de materiales, casita para los empleados, etc.

Esto se establece con el propósito de identificar todos aquellos espacios fundamentales que permitirán el correcto desarrollo de las actividades, reduciendo el riesgo negativo dentro de la obra (seguridad, medio ambiente, entre otros).

Una vez identificados dichos espacios, es crucial dentro del diseño plantear algunos aspectos que contribuyan al diseño y asignación como son: Dimensiones y alturas permitidas para cada una de las instalaciones, proceso constructivo, horario de trabajo, tipos de vehículos en circulación, equipamiento, elementos de Seguridad, etc.

Lo anterior, corresponde a las características tanto de las instalaciones como del proceso constructivo, lo que permite entre otras cosas acoplar el diseño de layout con las necesidades de la obra.

Una vez identificados estos elementos, inicia un proceso de jerarquización de áreas principales a través de temas como importancia dentro de la obra, procesos constructivos, seguridad, aspectos medio ambientales, etc. En los últimos proyectos investigativos respecto al diseño de layout de obra, la seguridad se ha convertido en un tema de gran relevancia para los profesionales ya que genera un gran impacto en aspectos de productividad, eficacia, costos y duración de actividades en obra (Sanad, Ammar, & Ibrahim, 2008) (Sanad, Ammar, & Ibrahim, 2008).

Igualmente, el realizar un análisis de prioridad de los espacios resulta relevante considerar otros aspectos como:

- **Geometría:** Durante el análisis el manejar instalaciones simétricas o rectangulares facilita no solo su asignación, sino que además permite identificar cuáles pueden ser los mejores ingresos a la misma (lado largo o corto del rectángulo) y facilita considerablemente los temas de circulación dentro de la obra.
- **Disponibilidad:** Al jerarquizar las áreas es posible garantizar o permitir la disponibilidad de algunos sectores dentro de la jornada laboral y evitar congestión en algunas zonas.
- **Planificar:** Es el tema crucial y la razón por la cual el diseño de layout termina en un papel tan relevante, la correcta planificación e implementación puede evitar fenómenos de cuellos de botella o Espagueti.

- Ampliaciones futuras: Tener en cuenta las áreas de expansión a un futuro pueden permitir reducir temas de imprevistos y retrasos dentro de la obra.

2.1 Ubicaciones predeterminadas (número de ubicaciones igual a número de instalaciones).

Para las ubicaciones predeterminadas existe una serie de espacios definidos en los cuales se pueden establecer las instalaciones temporales. El proceso de optimización de este tipo de ubicación consiste en jugar con las posibles combinaciones que se pueden realizar para lograr una reducción entre las distancias entre instalaciones a partir de unos criterios o parámetros. Es necesario, por tanto, que todas las celdas queden ocupadas por una instalación que posee las mismas características en geometría y dimensión que la celda o espacio.

La Figura 1 muestra un proyecto en el que se contempla la culminación de dos estructuras existentes (Edificio 1 y 2) y siete ubicaciones disponibles con áreas ya definidas para siete instalaciones temporales necesarias a ubicar dentro del área del proyecto.

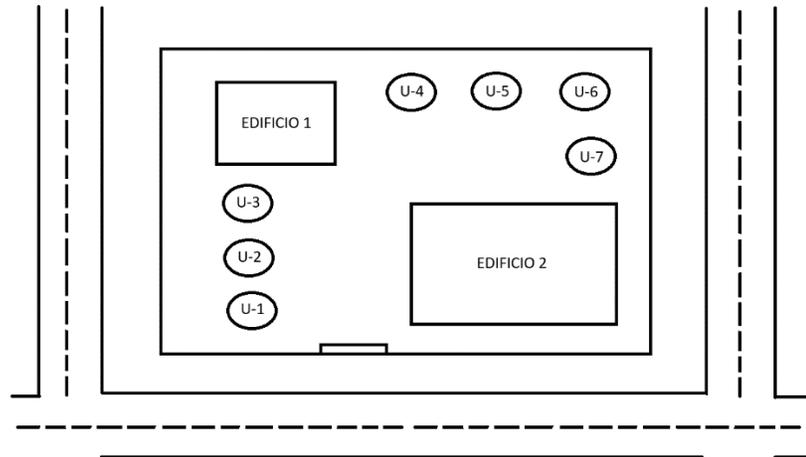


Figura 1. Geometría con número de ubicaciones igual a número de instalaciones

Dentro de las instalaciones a disponer dentro del proyecto tenemos:

Instalación 1 Depósito de hierro

Instalación 2 Almacén

Instalación 3 Restaurante

Instalación 4 Agregados

Instalación 5 Depósito de cemento

Instalación 6 Oficina

Instalación 7 Baños

Las cuales deben estar dispuestas de tal manera que se garantice las restricciones de dimensión de instalación y ubicación, flujo de materiales y personal, superposición y área del proyecto.

2.2 Ubicaciones predeterminadas (número de ubicaciones mayor a número de instalaciones).

Dependiendo de las características del proyecto y del terreno es posible que se presenten espacios o celdas vacías durante la distribución o asignación de instalaciones. Este contexto suele presentarse en proyectos de gran magnitud, que poseen un terreno de construcción considerable donde es posible habilitar varias zonas dentro del terreno. A continuación, en la figura 2, se evidencia un proyecto de área irregular que posee una estructura permanente (Edificio 1), diez (10) ubicaciones y siete (7) instalaciones a situar.

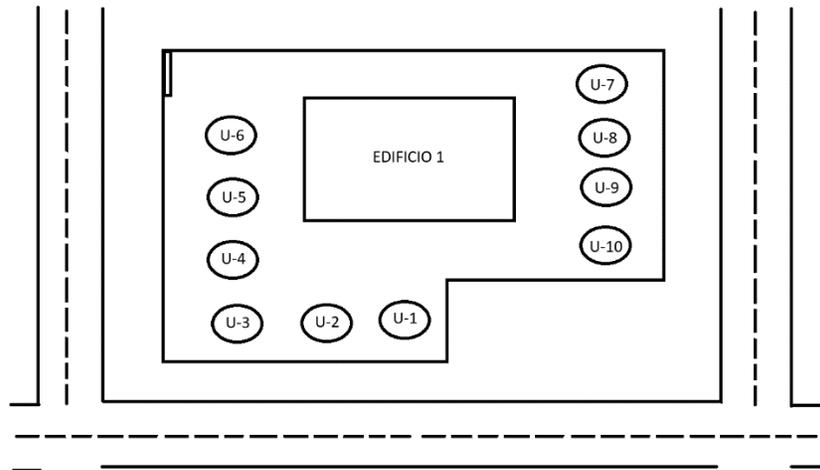


Figura 2. Geometría proyecto con varias celdas para asignación de instalaciones.

Dentro de las instalaciones a disponer dentro del proyecto tenemos:

Instalación 1 Oficina

Instalación 2 Baños

Instalación 3 Restaurante

Instalación 4 Agregados

Instalación 5 Depósito de cemento

Instalación 6 Deposito de hierro

Instalación 7 Bodega

2.3 Ubicaciones no predeterminadas.

Las instalaciones con ubicaciones no predeterminadas pueden ser asignadas en cualquier espacio disponible del área del proyecto, siempre y cuando no se presente alguna restricción para esta. Las principales condiciones que se deben tener en cuenta para este tipo de ubicaciones de instalaciones son las detalladas en la figura 3:

- Las instalaciones no pueden estar fuera de los límites del proyecto.
- Las instalaciones no se pueden superponer.
- Se deben respetar las áreas de control o de restricción en caso de que se presenten para la obra de construcción.

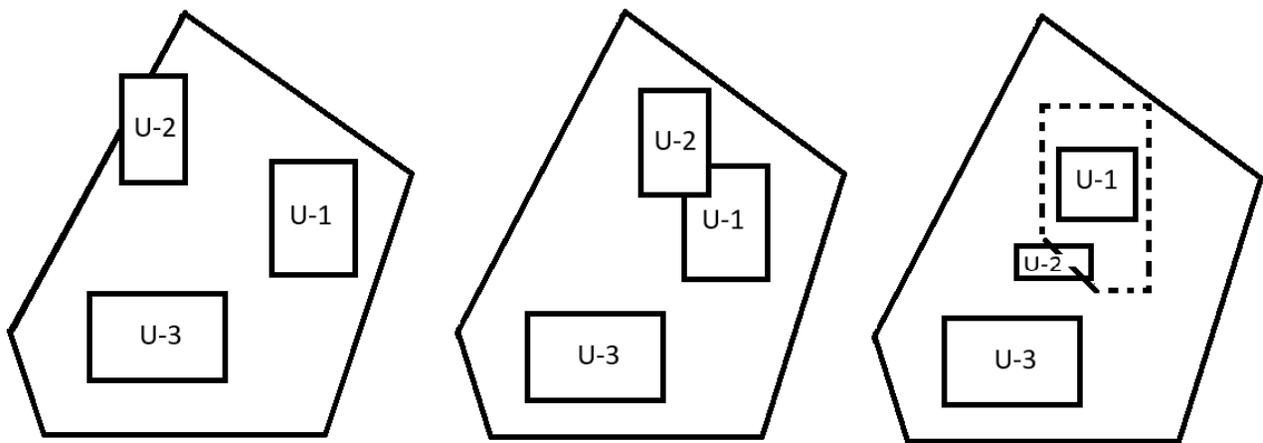


Figura 3. Restricciones comunes en ubicaciones no predeterminadas.

3. PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO)

El algoritmo PSO, o basado en enjambre de partículas es una metaheurística inspirada en el comportamiento social de una población (vuelo de aves, grupo de abejas, banco de peces, etc.) que fue desarrollada por el psicólogo James Kennedy y el ingeniero electrónico Russell Eberhart en el año 1995, los cuales manejaban una teoría que puede ser resumida así: “En una población los individuos que conviven en una sociedad tienen una opinión que es parte de un conjunto de creencias (el espacio de búsqueda) compartido por todos los posibles individuos”(Nieto, 2006). En conclusión, cada uno de estos individuos o partículas en movimiento puede modificar sus “creencias” de acuerdo con la siguiente información.

- o Conocimiento sobre el entorno.
- o Experiencias o conocimiento histórico.
- o Experiencia o conocimiento histórico de otros individuos

A partir de lo anterior, dentro del proceso de programación del algoritmo PSO, se identifica que la posición de cada individuo o partícula en movimiento representa una posible solución al problema en cuestión, donde generalmente una partícula se conforma así:

- Vector X_i : Posición actual de la partícula.
- Vector PBest: Mejor solución hasta el momento encontrada durante el proceso iterativo.
- Vector velocidad V_i : Gradiente según el cual se moverá la partícula.
- Valor $fitness_X_i$: Valor de la solución actual.
- Valor $fitness_Pbest$: Valor de la mejor solución encontrada.

3.1 Características del PSO

Los elementos principales que componen y caracterizan el proceso de optimización del algoritmo es la población y su comportamiento durante el cálculo iterativo. La forma en la que se configure el algoritmo y cada uno de sus individuos puede determinar el éxito o fracaso de la búsqueda de una mejor solución así:

- Cuando la población dentro del enjambre es muy pequeña es posible que el cálculo se limite o restrinja a la búsqueda de un mínimo local. Es decir, que no se evalúen los datos globales de una población de tamaño considerable.
- Al limitar el número de iteraciones dentro del enjambre, al momento de la búsqueda del mejor resultado es posible que el algoritmo no logre su convergencia, o mejor valor dentro de la iteración.
- Las condiciones iniciales o de partida del algoritmo pueden ser cruciales para garantizar menos tiempo e iteraciones dentro del cálculo.

3.2 Función velocidad y actualización de posición

De acuerdo con las características que posee el algoritmo basado en enjambre de partículas (PSO), para dar inicio al análisis de optimización es necesario realizar una asignación de valores aleatorios para la velocidad y posición inicial, para posteriormente continuar con el siguiente proceso así:

- a. Asignación de valor velocidad

$$(-vel_{max}; vel_{max})$$

Ecuación 1. Rango de velocidades iteración 0 PSO. Fuente: (Garcia Nieto, 2006)

De acuerdo con la literatura, se ha identificado que las velocidades iniciales con valor cero, tienden a tener resultados poco concluyentes.

b. Cálculo de la nueva posición.

$$x_i^k = x_i^k + v_i^k$$

Ecuación 2. Posición actual de la partícula Fuente: (Garcia Nieto, 2006)

c. Actualización del vector velocidad para cada iteración K.

$$v_i^{k+1} = \omega * v_i^k + \varphi_1 * rand_1 * (pBest - x_i^k) + \varphi_2 * rand_2 * (g_i - x_i^k)$$

Ecuación 3. Actualización del vector velocidad. Fuente: (Garcia Nieto, 2006)

Posteriormente se realiza la actualización a la posición de la partícula.

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1}$$

Ecuación 4. Actualización de la posición de la partícula. Fuente; (Garcia Nieto, 2006)

Como se identifica en la ecuación 3, para realizar la actualización del vector velocidad se debe tener en cuenta unos parámetros, los cuales son:

- $\omega =$ Factor Inercia.
- $\varphi_1; \varphi_2 =$ Componentes cognitivo y social.
- $rand_1; rand_2 =$ Números aleatorios entre 0 y 1.
- $g_i =$ Representa la mejor posición del entrono o cúmulo $pBest_{fitness}$.

El proceso anteriormente descrito, se repite para cada una de las iteraciones, con el propósito de obtener una convergencia hacia la mejor solución.

La figura 4 muestra el diagrama de flujo correspondiente al PSO de la investigación, con el que se observa el proceso que nos lleva a obtener el mínimo costo en una distribución de instalaciones dentro de un proyecto de construcción.

Con el propósito de mejorar la comprensión sobre el proceso de cálculo llevado a cabo por el algoritmo, se presenta el siguiente diagrama de flujo que permita visualizar el paso a paso de la metaheurística dentro la herramienta computacional de Matlab, así:

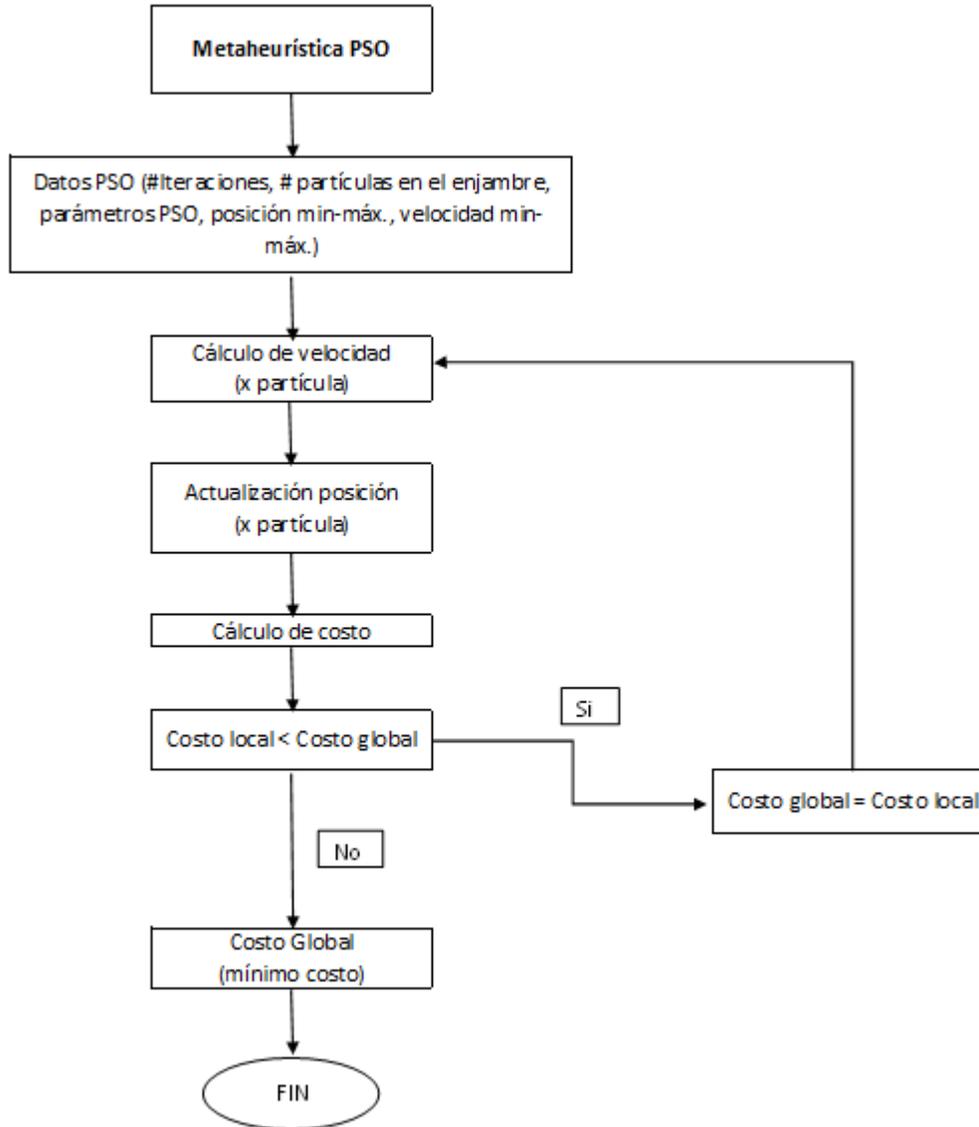


Figura 4. Diagrama de flujo algoritmo PSO.

4. TIPOS DE PROBLEMAS DE LAYOUT ANALIZADOS

En el presente capítulo, se incluye el procedimiento planteado para el desarrollo e implementación de una alternativa de optimización de diseño de layout mediante el uso de la metaheurística PSO o basada en enjambre de partículas para obras de edificación, a partir de revisión literaria. Teniendo en cuenta la estructura lógica del proceso de investigación y la importancia de controlar y verificar los diferentes aspectos que la constituyen, el proyecto parte de un planteamiento teórico y la configuración del modelo matemático (variables de diseño, parámetros de diseño, restricciones y función objetivo) para cada uno de los tipos de layout encontrados. A partir de esta alternativa se busca dar respuesta a la pregunta base de la investigación:

¿Cómo la optimización del proceso de planeación y planteamiento de ubicación de instalaciones temporales de obra mediante el uso de algoritmos basados en enjambre de partículas PSO puede beneficiar un proyecto de construcción de edificaciones en términos de disminución de tiempos y costos de recorridos entre instalaciones?

De acuerdo con lo anterior, se busca que la metodología de implementación del algoritmo de enjambre de partículas planteada, una vez sea aplicada en los casos de ubicación de instalaciones predeterminadas y no predeterminadas (layout de obra), permita obtener soluciones de mejor calidad en términos de distancia entre instalaciones, las cuales son medidas a partir de las trayectorias del transporte de equipos y/o material, valoradas en costo-tiempo, y una mejor convergencia medida en número de iteraciones.

4.1 Modelo matemático para el problema de ubicaciones predeterminadas (Número de ubicaciones igual a número de instalaciones)

Los casos 1, 2 y 3 corresponden a los siguientes artículos consultados e implementados en el proyecto de investigación:

- *An alternative approach to a harmony search algorithm for a construction site layout problem.* (Gholizadeh, Amiri, & Mohebi, 2010)
- *Particle Swarm Optimization for Construction Site Unequal-Area Layout* (Zhang & Wang, 2008).

Caso 1:

Este caso se encuentra basado en la frecuencia de viajes entre las instalaciones, donde se tiene en cuenta los siguientes criterios:

- a. Función Objetivo.

$$TC = \frac{1}{2} * \sum_i \sum_j f_{ij} * \delta_{\varphi_i, \varphi_j} + \sum C_{iK}$$

Ecuación 5. Función Objetivo. Fuente: (Gholizadeh et al., 2010).

- b. Variables de diseño.

TC = Costo total asociado al diseño

f_{ij} = Frecuencia de viaje

$\delta_{\varphi_i, \varphi_j}$ = Distancia entre instalaciones

C_{iK} = Costos

c. Restricciones.

Las restricciones principales presentadas en las ubicaciones predeterminadas son, evitar la superposición de instalaciones o que queden situadas fuera del área total del proyecto y asignar las instalaciones sobre ubicaciones de iguales características en términos de dimensión y geometría.

Caso 2:

Este caso se encuentra basado en la adyacencia entre las instalaciones, donde se tiene en cuenta los siguientes criterios:

a. Función objetivo.

$$TC = \sum_x \sum_i \delta_{xi} C_{xi} + \sum_x \sum_i \sum_y \sum_j \delta_{xi} \delta_{yi} A_{ij} D_{xy}$$

Ecuación 6. Función objetivo. Fuente:(Gholizadeh et al., 2010).

b. Variables de diseño.

δ_{xi} = "1" si la instalación está asignada a la ubicación, "0" si no está asignada.

D = Costo de permanencia de la instalación

$A_{i,j}$ = Adyacencia entre instalaciones

C_{ix} = Costos de asignación

c. Restricciones.

Al igual que en el caso 1 se maneja restricción de superposición, instalaciones en el interior del proyecto y asignación de elementos con las mismas características.

Caso 3:

Teniendo en cuenta la propuesta planteada para el proyecto de investigación, se realizó un caso adicional con algunas modificaciones propuestas por los investigadores. La función objetivo se mantiene basada en la frecuencia de viaje entre instalaciones, las variables y las restricciones establecidas para el ejercicio corresponden a las mismas evaluadas en el caso número 1.

4.2 Modelo matemático para el problema de ubicaciones predeterminadas (Número de ubicaciones mayor a número de instalaciones)

La información y artículo consultado e implementado en el proyecto de investigación que corresponden a los casos 4, 5 y 6, es:

- *The application of the ant colony optimization algorithm to the construction site layout-planning problem* (Lam et al., 2007)

La siguiente información aplica para todos los casos evaluados del artículo. Las variaciones presentadas en los 3 casos corresponden a las restricciones de penalidades en algunas instalaciones y la creación de una ubicación adicional (ejercicio planteado por los investigadores).

- a. Función Objetivo.

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^n f_{ij} d_{kl} x_{ik} x_{jl}$$

Ecuación 7. Función Objetivo. Fuente: (Lam et al., 2007).

- b. Variables de diseño.

f_{ij} = *Relación de proximidad entre instalaciones i,j*

La relación de proximidad o frecuencia es una variable que se calcula con los datos que se presentan a continuación:

$$f = w_1 C_{WF} + w_2 C_{IF} + w_3 C_{SE} + w_4 C_{PP}$$

Ecuación 8. Frecuencia o relación de cercanía entre instalaciones. Fuente: (Lam et al., 2007)

Donde:

$w_1 - w_2 - w_3 - w_4$ = Pesos para cada índice de cercanía.

C_{WF} = Índice de flujo de trabajo

C_{IF} = Índice de flujo de información

C_{SE} = Índice de seguridad y medio ambiente

C_{PP} = Índice de preferencia personal.

d_{kl} = distancia entre ubicaciones k,l

- c. Restricciones.

Este caso maneja restricciones de superposición y de penalización de celdas que no serán empleadas o utilizadas para almacenar instalaciones del proyecto.

4.3 Modelo matemático para el problema de ubicaciones no predeterminadas

La información y artículo consultado implementado en el proyecto de investigación que corresponden al caso 7 y 8, es:

- *A hybrid CAD-based construction site layout planning system using genetic algorithms* (Osman, Georgy, & Ibrahim, 2003)

Donde su modelo matemático está dado por los siguientes criterios:

- a. Función Objetivo.

$$Z = \sum \sum_{j < i} (W_{ij} * d_{ij})$$

Ecuación 9. Función Objetivo. Fuente: (Osman, Georgy, & Ibrahim, 2003)

- b. Variables de diseño.

W_{ij} = Peso de afinidad entre los objetos i j

d_{ij} = Distancia rectilínea entre los objetos i y j.

- c. Restricciones.

Las restricciones para estos casos son los límites del proyecto, evitar la superposición entre las instalaciones y garantizar que las instalaciones se encuentren dentro del área total del proyecto.

4.4 Herramienta computacional para la solución de los casos estudiados

El algoritmo PSO establecido en el proceso de investigación, trabaja en la búsqueda de una mejor solución siguiendo unos pasos de cálculo dentro del enjambre de partículas. En los anexos 5 a 11 es posible identificar el código de programación para cada uno de los casos de estudio.

Con el propósito de contextualizar y explicar a los posibles usuarios su funcionamiento, en el anexo 4, se establece un pequeño manual para explicar los aspectos más relevantes de la herramienta desarrollada por el grupo de investigación.

La herramienta computacional se desarrolló en una computadora tipo portátil marca Lenovo, con procesador Rycen 7 con tarjeta graficadora, con capacidad de 256 GB, una memoria RAM de 8 GB y un sistema operativo Windows 10.

5. EJEMPLOS NUMÉRICOS SELECCIONADOS

Los artículos relacionados a continuación se seleccionaron después de realizarse una revisión literaria en la que se identificaron características como parámetros y variables de diseño, restricciones, tipo de ubicación y algoritmo de optimización utilizado, que cumpliera con un porcentaje igual o superior a 70%, según los criterios de evaluación establecidos en el formato de revisión bibliográfica.

5.1 Ejemplo numérico ubicaciones predeterminadas (Número de ubicaciones igual a número de instalaciones) (Gholizadeh et al., 2010) (Zhang & Wang, 2008)

Contexto caso 1

A continuación, se presenta el análisis del caso 1, que corresponde a un proyecto con un total de (11) once ubicaciones con (11) once instalaciones disponibles, que posee adicionalmente una estructura fija central (edificio existente), la cual no es considerada dentro del proceso de optimización, pero que forma parte de la estructura y distribución interna del proyecto. Este caso es planteado, estudiado y solucionado por los dos artículos mencionados con anterioridad, donde el artículo 1 (Gholizadeh et al., 2010), realizaba la optimización con una metaheurística armónica y el segundo (Zhang & Wang, 2008) implementaba el algoritmo PSO, similar al del proyecto investigativo.

a. Asignación inicial-área del proyecto.

La tabla 1, ilustra las instalaciones y la geometría que se establece el caso de estudio 1.

Tabla 1. Instalaciones para caso 1. Fuente: (Gholizadeh et al., 2010)

Ítem	Instalación
1	Oficina del sitio
2	Taller
3	Residencia Laboral
4	Almacén 1
5	Almacén 2
6	Taller de carpintería
7	Taller de refuerzo de acero
8	Puerta lateral
9	Sala de control de servicios
10	Taller de lotes en concreto
11	Puerta principal

Los datos del ejercicio permiten identificar al lector que la frecuencia y la distancia entre instalaciones poseen una relación inversa, es decir, a medida que disminuye la distancia entre instalaciones es posible obtener o presentar una mayor frecuencia de viajes. La matriz de costo por otra parte es empleada como forma de penalización o asignación de restricciones, con el fin de garantizar que las instalaciones con costo cero permanezcan o se sitúen sobre determinadas ubicaciones.

Las ubicaciones poseen una respectiva dimensión que impide la asignación de algunas instalaciones, definidas por el autor en la tabla 3 y 4:

Tabla 3. Dimensiones de las instalaciones. Fuente: (Zhang & Wang, 2008)

Dimensiones	7,5	5,5	7,5	5,5	5,5	5,5	5,5	6,2	5,5	7,6	7,2
Instalaciones	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Tabla 4. Dimensiones de las ubicaciones. Fuente: (Zhang & Wang, 2008)

Dimensiones	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	5,5	5,5	7,6	7,6	7,6
Ubicaciones	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Nota: Las lecturas 1 y 2, daban solución al problema de layout del caso 1, su diferencia radica en la metaheurística empleada por los autores (Algoritmo Armónico y Algoritmo PSO).

Contexto caso 2

El caso dos corresponde a un proyecto que posee doce (12) instalaciones y doce (12) ubicaciones disponibles. Adicionalmente contiene dos estructuras fijas en el centro del área de construcción (no cuentan dentro del proceso iterativo). A diferencia del caso anterior, los accesos al proyecto no cuentan dentro de las instalaciones a asignar, por lo cual se encuentran fijas. Para este caso se establece un análisis únicamente entre un algoritmo armónico (Gholizadeh et al., 2010) y el algoritmo PSO de la investigación.

a. Asignación inicial área del proyecto.

La asignación inicial del artículo (Gholizadeh et al., 2010), descrita en la tabla 5, se realiza nuevamente de forma consecutiva. En el caso de la investigación se tienen en cuenta las restricciones para los datos de partida de la primera asignación. Con esto, se busca que el algoritmo inicie su proceso de iteración con un margen de error mucho más bajo. Esto puede facilitar dentro de los cálculos de la metaheurística la búsqueda de una mejor respuesta y reducir factores de tiempo y de número de iteraciones,

A diferencia del caso anterior, los accesos del proyecto (entrada y salidas), no cuentan como instalaciones para asignar, por lo cual, pueden ser establecidos como estructuras fijas.

Tabla 5. Lista de instalaciones caso 2. Fuente: (Gholizadeh et al., 2010)

Ítem	Instalación
1	Taller acero de refuerzo 1
2	Taller acero de refuerzo 2
3	Tienda de carpintería 1
4	Tienda de carpintería 2
5	Tienda de trabajos 1
6	Tienda de trabajos 2
7	Planta de concretos 1
8	Planta de concretos 2
9	Oficina de empleos
10	Residencia laboral
11	Equipo de electricidad y suministro de agua
12	Almacén

b. Datos del proyecto

Los datos relevantes del proyecto que permiten el proceso de iteración son: Las matrices de costo de construcción, adyacencia entre instalaciones y costo interactivo y, las respectivas dimensiones de instalaciones y ubicaciones referidas en las tablas 6 y 7 del caso de estudio.

Tabla 6. Dimensiones de las instalaciones. Fuente: (Zhang & Wang, 2008)

Dimensiones	7,5	5,5	7,5	5,5	5,5	5,5	5,5	6,2	5,5	7,6	7,2	5,5
Instalaciones	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Tabla 7. Dimensiones de las ubicaciones. Fuente: (Zhang & Wang, 2008)

Dimensiones	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	5,5	5,5	7,6	7,6	7,6	5,5
Ubicaciones	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Tabla 8. Matrices de costo de construcción, costo interactivo adyacencia y asignación de instalaciones. Fuente: Gholizadeh et al., 2010)

<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th colspan="12">Dxi</th> </tr> <tr> <th></th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> <th>8</th> <th>9</th> <th>10</th> <th>11</th> <th>12</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><th>1</th><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>2</th><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>3</th><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>4</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>5</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>6</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>7</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>8</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>9</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>10</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>11</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><th>12</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>														Dxi													1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th colspan="12">Cxi</th> </tr> <tr> <th></th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> <th>8</th> <th>9</th> <th>10</th> <th>11</th> <th>12</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><th>1</th><td>35</td><td>35</td><td>30</td><td>30</td><td>35</td><td>15</td><td>10</td><td>15</td><td>6</td><td>6</td><td>7</td><td>10</td></tr> <tr><th>2</th><td>35</td><td>30</td><td>9</td><td>9</td><td>13</td><td>30</td><td>30</td><td>35</td><td>15</td><td>18</td><td>12</td><td>7</td></tr> <tr><th>3</th><td>18</td><td>15</td><td>15</td><td>15</td><td>15</td><td>8</td><td>14</td><td>10</td><td>8</td><td>10</td><td>15</td><td>15</td></tr> <tr><th>4</th><td>13</td><td>7</td><td>12</td><td>18</td><td>18</td><td>15</td><td>15</td><td>15</td><td>15</td><td>8</td><td>8</td><td>12</td></tr> <tr><th>5</th><td>18</td><td>15</td><td>15</td><td>20</td><td>15</td><td>8</td><td>10</td><td>8</td><td>8</td><td>7</td><td>15</td><td>15</td></tr> <tr><th>6</th><td>14</td><td>8</td><td>10</td><td>17</td><td>12</td><td>15</td><td>15</td><td>15</td><td>15</td><td>8</td><td>7</td><td>9</td></tr> <tr><th>7</th><td>32</td><td>35</td><td>15</td><td>15</td><td>15</td><td>10</td><td>9</td><td>13</td><td>7</td><td>10</td><td>15</td><td>15</td></tr> <tr><th>8</th><td>31</td><td>30</td><td>9</td><td>8</td><td>15</td><td>18</td><td>15</td><td>16</td><td>15</td><td>15</td><td>15</td><td>15</td></tr> <tr><th>9</th><td>39</td><td>35</td><td>13</td><td>8</td><td>8</td><td>15</td><td>18</td><td>15</td><td>8</td><td>18</td><td>9</td><td>18</td></tr> <tr><th>10</th><td>18</td><td>8</td><td>8</td><td>8</td><td>15</td><td>10</td><td>15</td><td>15</td><td>13</td><td>15</td><td>15</td><td>15</td></tr> <tr><th>11</th><td>7</td><td>10</td><td>8</td><td>19</td><td>15</td><td>10</td><td>10</td><td>8</td><td>15</td><td>10</td><td>6</td><td>15</td></tr> <tr><th>12</th><td>9</td><td>10</td><td>6</td><td>7</td><td>7</td><td>7</td><td>15</td><td>15</td><td>18</td><td>15</td><td>15</td><td>12</td></tr> </tbody> </table>														Cxi													1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	35	35	30	30	35	15	10	15	6	6	7	10	2	35	30	9	9	13	30	30	35	15	18	12	7	3	18	15	15	15	15	8	14	10	8	10	15	15	4	13	7	12	18	18	15	15	15	15	8	8	12	5	18	15	15	20	15	8	10	8	8	7	15	15	6	14	8	10	17	12	15	15	15	15	8	7	9	7	32	35	15	15	15	10	9	13	7	10	15	15	8	31	30	9	8	15	18	15	16	15	15	15	15	9	39	35	13	8	8	15	18	15	8	18	9	18	10	18	8	8	8	15	10	15	15	13	15	15	15	11	7	10	8	19	15	10	10	8	15	10	6	15	12	9	10	6	7	7	7	15	15	18	15	15	12
	Dxi																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	Cxi																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
1	35	35	30	30	35	15	10	15	6	6	7	10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
2	35	30	9	9	13	30	30	35	15	18	12	7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
3	18	15	15	15	15	8	14	10	8	10	15	15																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
4	13	7	12	18	18	15	15	15	15	8	8	12																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
5	18	15	15	20	15	8	10	8	8	7	15	15																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
6	14	8	10	17	12	15	15	15	15	8	7	9																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
7	32	35	15	15	15	10	9	13	7	10	15	15																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
8	31	30	9	8	15	18	15	16	15	15	15	15																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
9	39	35	13	8	8	15	18	15	8	18	9	18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
10	18	8	8	8	15	10	15	15	13	15	15	15																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
11	7	10	8	19	15	10	10	8	15	10	6	15																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
12	9	10	6	7	7	7	15	15	18	15	15	12																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Asignación de instalación													Costo de construcción																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th colspan="12">Aij</th> </tr> <tr> <th></th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> <th>8</th> <th>9</th> <th>10</th> <th>11</th> <th>12</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><th>1</th><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>2</th><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>3</th><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>4</th><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>5</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>6</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>7</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>8</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>9</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>10</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><th>11</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><th>12</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>														Aij													1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th colspan="12">Dxy</th> </tr> <tr> <th></th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> <th>8</th> <th>9</th> <th>10</th> <th>11</th> <th>12</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><th>1</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>100</td><td>100</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>2</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>100</td><td>100</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>3</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>4</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>5</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>6</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>7</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>8</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>9</th><td>100</td><td>100</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>10</th><td>100</td><td>100</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>11</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><th>12</th><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>														Dxy													1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Aij																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
3	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
4	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
5	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
6	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
7	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
8	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
9	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	Dxy																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
1	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
2	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
9	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
10	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Adyacencia entre instalaciones													Costo interactivo																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								

Contexto caso 3

Este caso corresponde a la propuesta de los investigadores con el fin de identificar el comportamiento de layout de obra y del algoritmo PSO. Se maneja un total de 12 ubicaciones con 12 instalaciones. Se construye la fila y columna adicional para las matrices de frecuencia, distancia y costo.

a. Datos del ejercicio

En la tabla 9, se evidencian los valores y estructura de las matrices de frecuencia, distancia y costo creadas para el caso 3 de ubicaciones predeterminadas (número de ubicaciones igual a número de instalaciones).

Las dimensiones de instalaciones y ubicaciones que el autor estableció dentro de su investigación se encuentran relacionados en la tabla 10 y 11.

Tabla 10. Dimensiones de las instalaciones. Fuente: (Zhang & Wang, 2008)

Dimensiones	7,5	5,5	7,5	5,5	5,5	5,5	5,5	6,2	5,5	7,6	7,2	5,5
Instalaciones	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Tabla 11. Dimensiones de las ubicaciones. Fuente: (Zhang & Wang, 2008)

Dimensiones	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	5,5	5,5	7,6	7,6	7,6	5,5
Ubicaciones	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

5.2 Ejemplo numérico ubicaciones predeterminadas (Número de ubicaciones mayor a número de instalaciones) (Lam et al., 2007)

Contexto casos

El proyecto evaluado para este tipo de layout corresponde a un campamento que posee un total de nueve (9) instalaciones temporales con trece (13) ubicaciones disponibles para la correspondiente asignación. De acuerdo con esto, se presenta un caso 1 en el que se realiza una penalización a las ubicaciones 1-2-9 y 10 del proyecto, el caso 2 posee penalización en las ubicaciones 1-2-3 y 10, y el caso 3 corresponde a una propuesta de los investigadores, en el que se habilita una ubicación adicional dentro del proyecto, para así evidenciar la interacción del algoritmo con el nuevo planteamiento y con una opción adicional de asignación.

Caso 4-Caso 5

El análisis de la asignación de las instalaciones parte de un orden consecutivo en el caso del artículo guía. En el caso de la investigación se realiza al igual que en los casos anteriores, asignación aleatoria con cumplimiento de restricciones. Teniendo en cuenta las características del artículo y los resultados brindados por este, se identifica una restricción de uso en algunas ubicaciones. Por lo cual, las matrices de penalización son establecidas por los investigadores dada la necesidad del proceso de cálculo.

a. Distribución y estructura del proyecto.

La tabla 12, muestra la asignación inicial del proyecto, mediante la cual parte el proceso iterativo del algoritmo de colonia de hormigas.

Matriz Penalización 1-2-3-10													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
2	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
3	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 14. Índices de importancia – pesos de índices. Fuente: (Lam et al., 2007)

w1	0,2748	WF	7,9393
w2	0,2620	IF	7,6000
w3	0,2626	SE	7,6000
w4	0,2006	PP	5,8667

Caso 6

Como propuesta al análisis de diseño de layout para el caso de ubicaciones predeterminadas con número de ubicaciones mayor a número de instalaciones, se presenta un caso 3 en el cual se crea una celda o ubicación adicional dentro del área del proyecto. Esta toma el puesto a nivel matricial de la fila 11, es decir, las demás celdas se corren un puesto dentro de la matriz, para un total de 14 filas. De acuerdo con lo anterior la matriz resultante es la establecida en la tabla 15:

Tabla 15. Matriz de distancia entre instalaciones, adición fila 11 (nueva ubicación).

MATRIZ DE DISTANCIA														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	1	2	6	7	9	12	14	16	17	15	13	4	9
2	1	0	1	5	6	8	11	13	15	16	14	12	3	8
3	2	1	0	4	5	7	10	12	14	15	13	11	2	7
4	6	5	4	0	1	3	7	9	11	12	10	9	2	5
5	7	6	5	1	0	2	6	8	10	11	9	8	3	4
6	9	8	7	3	2	0	3	5	7	8	6	8	5	4
7	12	11	10	7	6	3	0	2	4	5	3	7	6	3
8	14	13	12	9	8	5	2	0	2	3	1	5	8	3
9	16	15	14	11	10	7	4	2	0	1	1	3	11	6
10	17	16	15	12	11	8	5	3	1	0	2	2	12	7
11	15	14	13	10	9	6	3	1	1	2	0	4	7	2
12	13	12	11	9	8	8	7	5	3	2	4	0	9	5
13	4	3	2	2	3	5	6	8	11	12	7	9	0	4
14	9	8	7	5	4	4	3	3	6	7	2	5	4	0

Los valores de distancia establecida para la fila 11 sitúa la nueva ubicación entre las celdas 8 y 9. Los datos de la fila se asignaron de tal forma que existiera simetría de distancia entre las instalaciones a partir de las distancias existentes de las filas ubicaciones contiguas.

5.3 Ejemplo numérico ubicaciones no predeterminadas (Osman et al., 2003)

Contexto caso 7

A continuación, en la tabla 16, se evidencia un proyecto de geometría irregular, compuesto por 6 lados representados por una función en términos de x. El proyecto está conformado por un total de 4 instalaciones que se acomodan sobre el proyecto mediante coordenadas (X, Y) localizadas en la esquina inferior izquierda de cada instalación. La geometría de las instalaciones es rectangular, esto con el propósito de facilitar su asignación sobre el plano y de verificar las restricciones entre ellas principalmente de superposición y de su ubicación dentro de los límites del plano.

a. Distribución y estructura del proyecto

Tabla 16. Asignación y estructura inicial del proyecto. Fuente: (Osman et al., 2003).

Instalaciones	Geometría del Proyecto
Instalación 1	<p>The diagram shows an irregular polygonal project area with a hatched interior. The vertices are at (5,60), (45,90), (75,30), and (25,10). The boundaries are defined by the following equations: $Y = X + 55$ (top-left), $Y = -X + 188$ (top-right), $X = 5$ (left), $X = 75$ (right), $Y = 10$ (bottom), and $Y = -X + 75$ (bottom-left). Four yellow rectangular installations are placed within the area, each with its bottom-left corner at a specific coordinate: Installation 1 at (25,10), Installation 2 at (5,30), Installation 3 at (5,60), and Installation 4 at (45,90).</p>
Instalación 2	
Instalación 3	
Instalación 4	

b. Datos del proyecto

Los datos representativos del proyecto corresponden a la geometría con las respectivas funciones de las rectas y la matriz de pesos de cercanía.

- Límites del proyecto

$$\begin{aligned}x &\geq 5 \\y &\leq x + 55 \\y &\leq -2x + 180 \\y &\leq -x + 35 \\x &\leq 75 \\y &\geq 10\end{aligned}$$

Ecuación 10. Restricciones.(Osman et al., 2003)

- Matriz de pesos de cercanía entre instalaciones

Pesos de cercanía entre instalaciones				
	1	2	3	4
1	0	9	37	3
2	9	0	81	0
3	37	81	0	9
4	3	0	9	0

Figura 5. Matriz de pesos de cercanía entre instalaciones.(Osman et al., 2003).

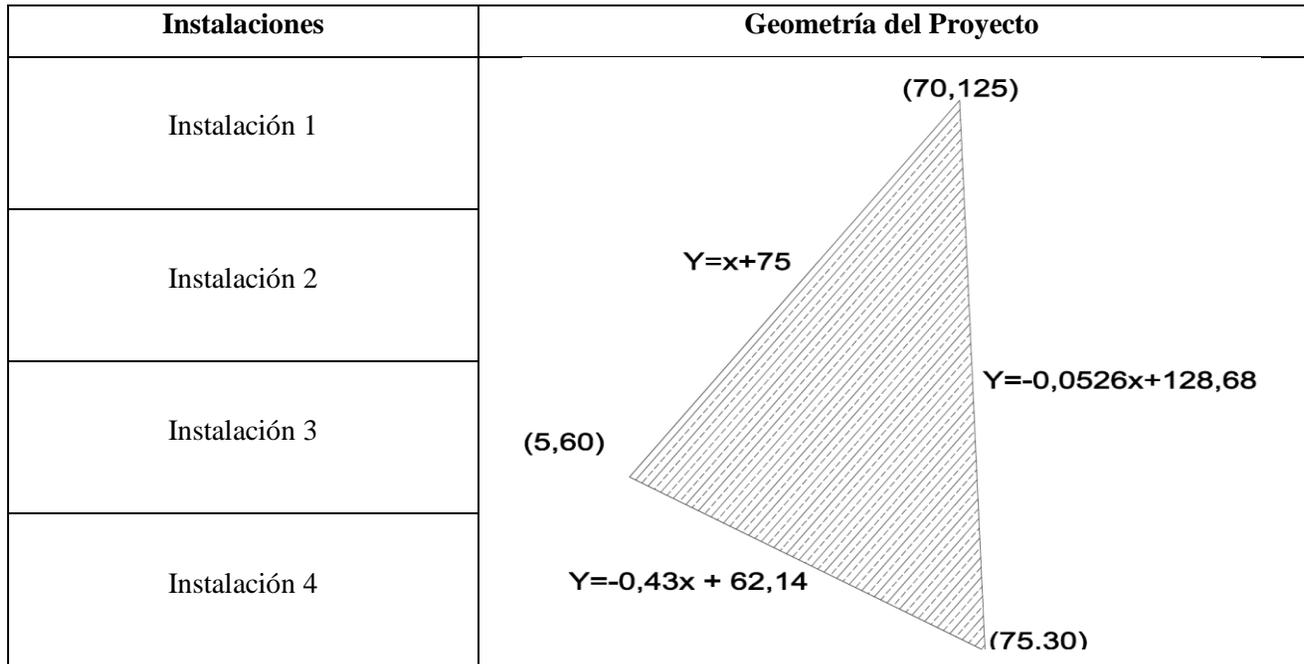
Contexto caso 8

Como propuesta al análisis de diseño de layout para el caso de ubicaciones no predeterminadas, se presenta un caso 8 en el cual se diseña un proyecto con una geometría triangular, donde cada uno de los lados posee una función en términos de x. El proyecto está conformado por un total de 4 instalaciones que se acomodan sobre el proyecto mediante coordenadas (X, Y) localizadas en la esquina inferior izquierda de cada instalación. Igualmente se propone una geometría de las instalaciones rectangular, con el propósito de facilitar su asignación sobre el plano y de verificar las restricciones entre ellas principalmente de superposición y de su ubicación dentro de los límites del plano.

a. Distribución y estructura del proyecto

La geometría se plantea a partir de 3 puntos y una recta del caso 7. Las otras dos rectas son calculadas por los investigadores mediante dos coordenadas respectivamente. En la tabla 17 se detalla la geometría propuesta.

Tabla 17. Geometría propuesta.



b. Datos del proyecto

Para el análisis del ejercicio se emplea la misma matriz de pesos del caso 7.

- Límites del proyecto

$$y \leq x + 75$$

Ecuación 11. Recta base de la geometría, tomada del artículo guía. (Osman et al., 2003)

$$y \leq -0,0526x + 128,68$$

$$y \leq -0,43x + 62,14$$

Ecuación 12. Ecuaciones establecidas en la investigación.

- Matriz de pesos de cercanía entre instalaciones

Pesos de cercanía entre instalaciones				
	1	2	3	4
1	0	9	37	3
2	9	0	81	0
3	37	81	0	9
4	3	0	9	0

Figura 6. Matriz de pesos de cercanía entre instalaciones. (Osman et al., 2003)

6. RESULTADOS

Los resultados obtenidos para cada uno de los casos estudiados se relacionan a continuación, según el tipo de ubicación.

6.1 Ubicaciones predeterminadas. Número de ubicaciones igual a número de instalaciones

Caso 1

a. Diseño de layout encontrado por el artículo y el algoritmo PSO de la investigación.

El caso 1 como se explicaba con anterioridad, se encontraba planteado en dos artículos diferentes. Cada uno de ellos obtiene un diseño de layout diferente durante el proceso de optimización.

El primero de ellos planteaba una optimización con una metaheurística armónica, detallada en la tabla 18 en donde se obtenía la siguiente asignación óptima.

Tabla 18. Layout de obra optimizado con algoritmo armónico. Fuente: (Gholizadeh et al., 2010)

Ubicación	Instalación
1	Puerta lateral (8)
2	Taller de lotes en concreto (10)
3	Taller de carpintería (6)
4	Sala de control de servicios (9)
5	Almacén 1 (4)
6	Residencia laboral (3)
7	Taller de refuerzo de acero (7)
8	Almacén 2 (5)
9	Taller (2)
10	Puerta principal 11
11	Oficina del sitio (1)

El segundo artículo (Zhang & Wang, 2008) realizaba una optimización del diseño de layout mediante un algoritmo basado en enjambre de partículas similar a el proceso de optimización. Tanto el PSO del artículo como el PSO de la investigación cumplen con las restricciones y parámetros requeridos en el caso de estudio. De acuerdo con lo anterior, en las tablas 19 y 20 se observa la asignación del PSO del artículo analizado y del PSO de la investigación.

Tabla 19. Layout de obra optimizado con algoritmo PSO artículo. Fuente:(Zhang & Wang, 2008)

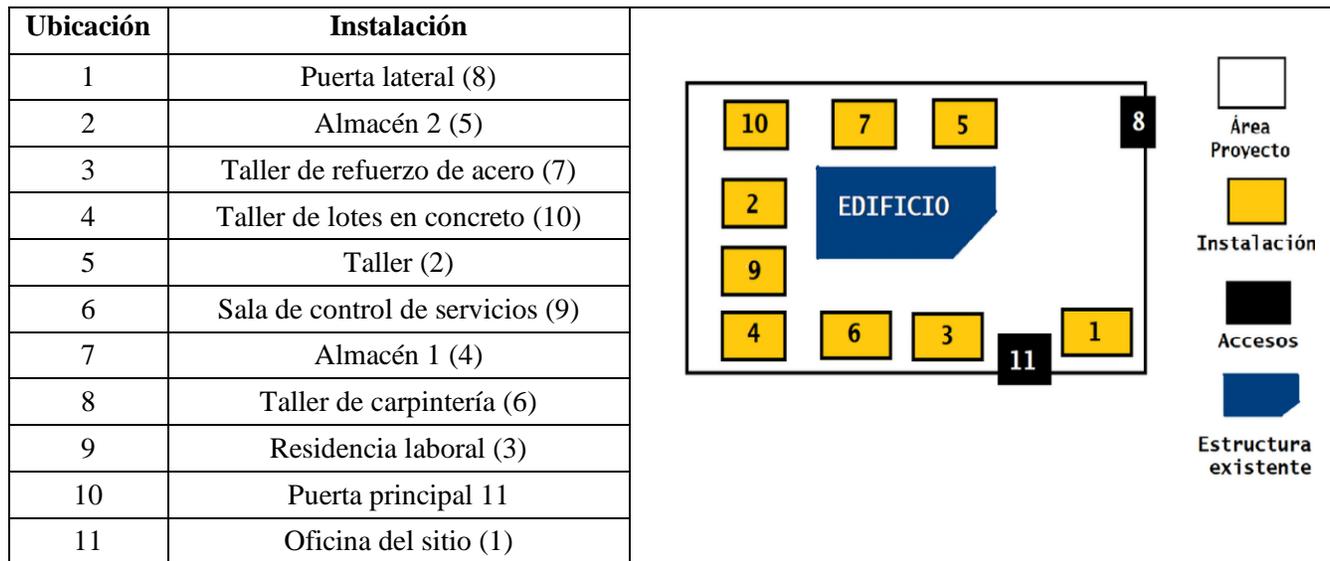
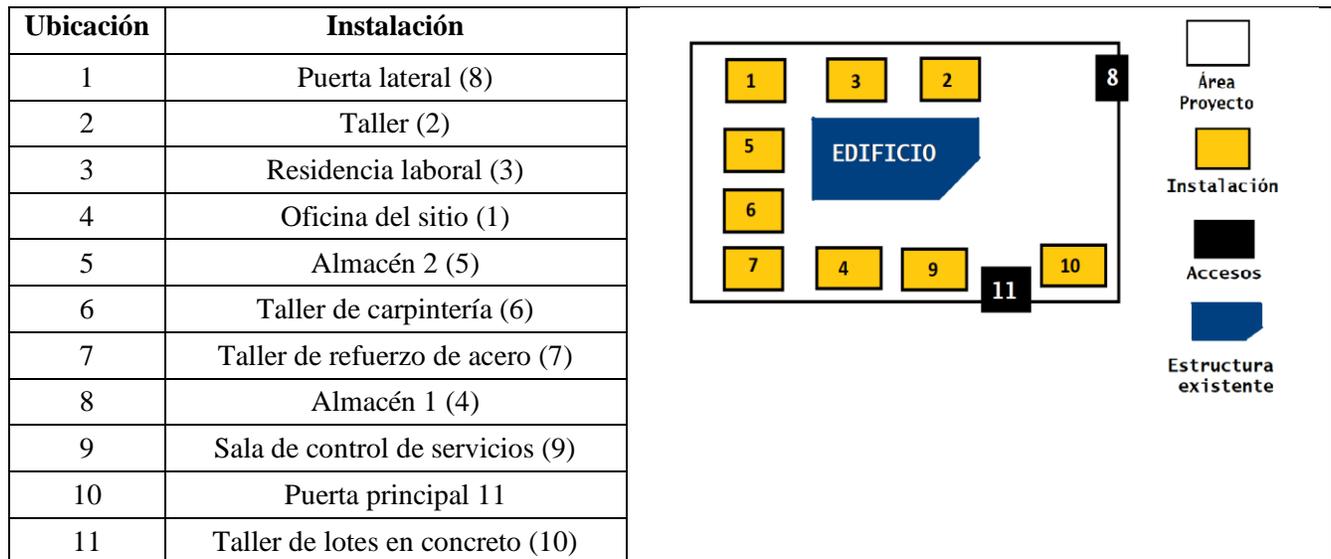


Tabla 20. Layout de obra optimizado con el PSO propuesto en la investigación.



b. Función objetivo evaluada en las metaheurísticas (algoritmo armónico, algoritmo PSO del artículo, algoritmo PSO de la investigación).

Una vez obtenida la asignación de espacios brindada por el algoritmo de la investigación, se procede a evaluar la función objetivo para así identificar y comparar cual de todas las opciones de layout permite lograr el menor valor de la función objetivo. Es relevante mencionar que cada análisis se compara a nivel global, es decir, costo total de asignación, como se muestra en la tabla 21.

Tabla 21. Comparativo de resultados en costo-iteración-tiempo.

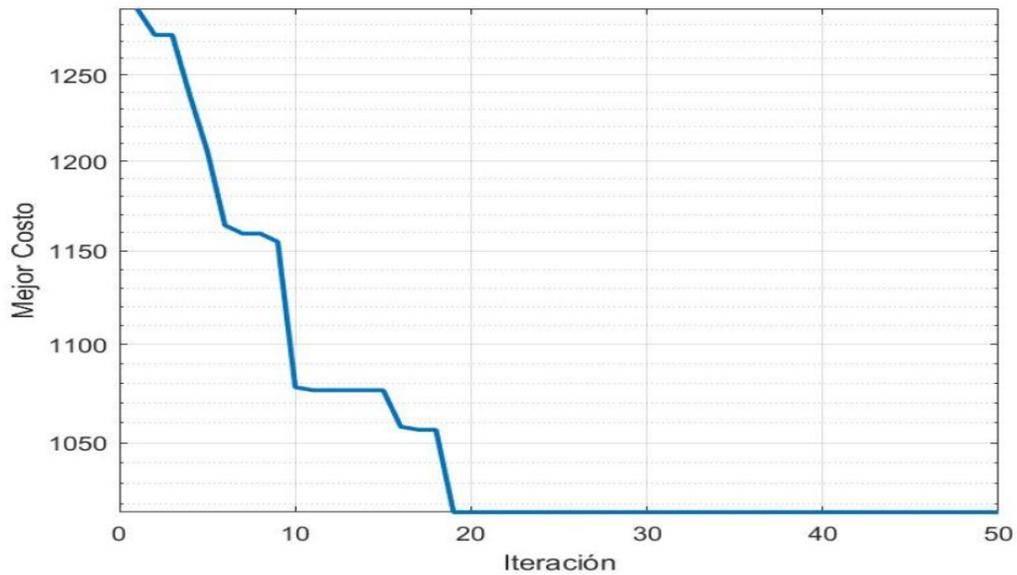
Ubicación	Función Objetivo Armónico	Función Objetivo PSO artículo (\$)	Función Objetivo PSO Investigación (\$)
1	27,5	27,5	27,5
2	235	112,5	100
3	168	199	100
4	452	222,5	133
5	156	112,5	100
6	168	170	100
7	100	156	100
8	117	160	112
9	200	230	100
10	150	125	25
11	110	110	125
Total (\$)	1.883,5	1625	1022,5
Iteración de convergencia	30	42	21
Tiempo (s)	3,21	-	2,9

A nivel de tiempos de convergencia, no se menciona en el documento de referencia (Gholizadeh et al., 2010) cual es el tipo de herramienta computacional o el equipo que corre los programas, aunque si señala que al igual como en el PSO de la investigación el número de partículas puede influir en el tiempo de búsqueda de respuesta, en el algoritmo armónico los valores de los parámetros pueden ser cruciales en la eficacia o rapidez en los procesos de optimización.

Por otra parte, en cuanto al PSO del artículo (Zhang & Wang, 2008), es posible inferir que es una metaheurística que presenta buenos resultados para problemas de diseño de layout al igual que el algoritmo de investigación. Para ambos casos se utilizaban parámetros similares del algoritmo PSO (de acuerdo con la literatura y que han evidenciado una mejor respuesta en términos de convergencia para el algoritmo (Nieto, 2006)) empleando valores de velocidad entre 0 y 2 (en el caso de la investigación se empleaban valores entre 0 y 1) y variando el número de partículas y elementos en el enjambre.

Como parte del análisis de investigación y de acuerdo con el código de programación que se diseñó para este y todos los casos, se concluye además que la iteración cero, es decir, el punto de partida del proceso de optimización es clave en la búsqueda de mejores resultados. Dentro del trabajo realizado, el diseño inicial de layout es verificado a nivel de programación en términos de las restricciones del problema, que en este caso corresponden a las dimensiones entre instalaciones y ubicaciones.

Para este caso la gráfica 1, es la obtenida en términos de convergencia con el uso del PSO de la investigación.



Gráfica 1. Gráfica de convergencia PSO de investigación.

El algoritmo de optimización PSO del trabajo de investigación permite obtener un mejor resultado en cuanto a la función objetivo y número de iteraciones. Al ser evaluada en varias oportunidades en la herramienta computacional se identificó que es posible obtener soluciones similares en términos de función objetivo con una asignación diferente.

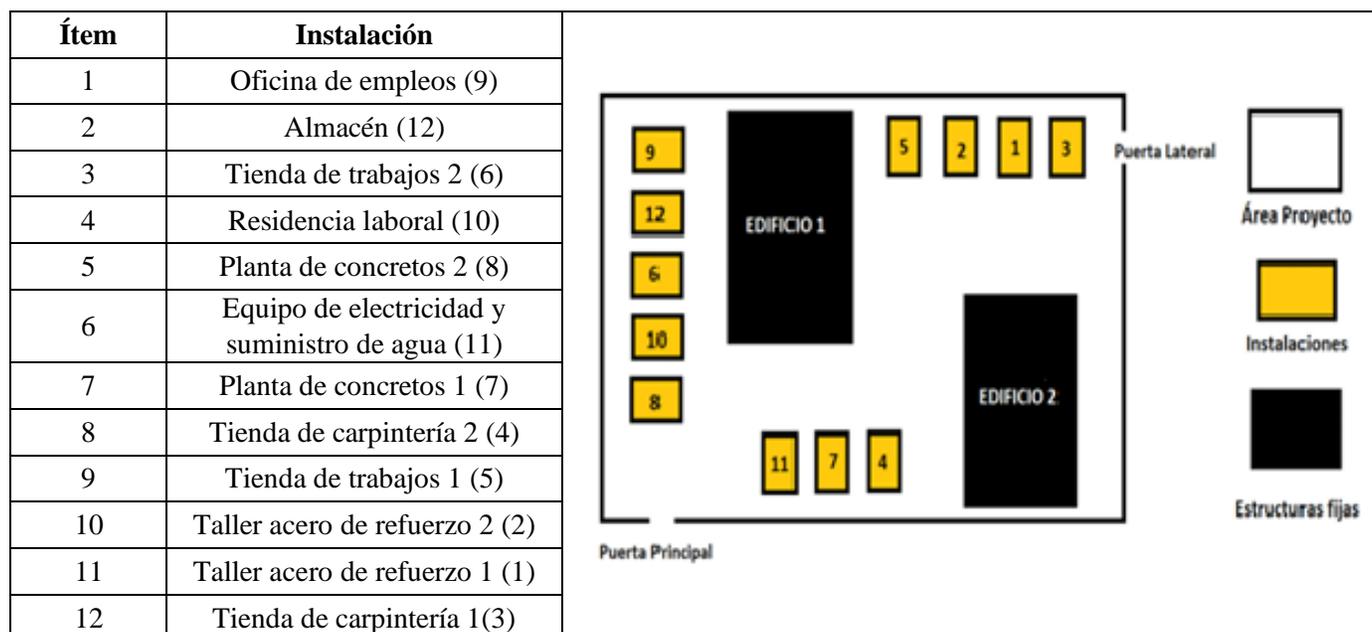
Caso 2

Una vez realizado el proceso de optimización se obtiene la siguiente asignación con el algoritmo armónico del artículo (Gholizadeh et al., 2010) el cual cumple con las restricciones de las dimensiones tanto de ubicaciones como de instalaciones y que no presenta superposición de sus elementos.

a. Diseño de layout encontrado por el artículo y el algoritmo PSO de la investigación.

La asignación óptima encontrada en el artículo seleccionado, al utilizar el algoritmo armónico una vez realizado el proceso de optimización es la descrita en la tabla 22.

Tabla 22. Asignación óptima de instalaciones con algoritmo armónico caso 2. Fuente (Amiri et al., 2012)



El PSO de la investigación realiza la siguiente asignación de instalaciones que genera un costo de diseño de layout igual al del algoritmo armónico, pero con una distribución diferente. Esto permite identificar que son problemas multiobjetivo (diferentes posibles soluciones), por lo que dada su naturaleza evidencia la necesidad de diferentes restricciones que limiten el comportamiento del algoritmo y que promuevan la búsqueda de una única respuesta. Adicionalmente, cabe resaltar que los datos arrojados en el proceso iterativo pueden presentar algunas modificaciones en términos de número de convergencia, dado que este valor puede disminuir como resultado de aumentar las partículas o individuos en el enjambre.

Aplicado a un problema real, requiere de la opinión y criterio de un profesional idóneo que identifique las necesidades de su proyecto. A mayor número de restricciones y de parámetros que limiten y permitan evaluar un proyecto claro y concreto, será mayor la posibilidad de obtener resultados idóneos para cualquier tipo de metaheurística que se desee implementar.

La asignación de instalaciones encontrada al realizar el proceso de optimización con el algoritmo de la investigación es la establecida en la tabla 23.

Tabla 23. Asignación de instalaciones con algoritmo PSO de la investigación.

Ítem	Instalación
1	Residencia laboral (10)
2	Almacén (12)
3	Tienda de trabajos 2 (6)
4	Taller acero de refuerzo 2 (2)
5	Planta de concretos 2 (8)
6	Equipo de electricidad y suministro de agua (11)
7	Planta de concretos 1 (7)
8	Tienda de carpintería 2 (4)
9	Oficina de empleos (9)
10	Tienda de carpintería 1(3)
11	Taller acero de refuerzo 1 (1)
12	Tienda de trabajos 1 (5)

El diagrama muestra un sitio de construcción con dos edificios, EDIFICIO 1 y EDIFICIO 2, representados por rectángulos negros. Alrededor de los edificios se distribuyen 12 instalaciones, representadas por cuadrados amarillos con números del 1 al 12. A la izquierda del sitio se indica la 'Puerta Principal' y a la derecha la 'Puerta Lateral'. A la derecha del diagrama hay una leyenda: un rectángulo blanco para 'Área Proyecto', un cuadrado amarillo para 'Instalaciones' y un rectángulo negro para 'Estructuras fijas'.

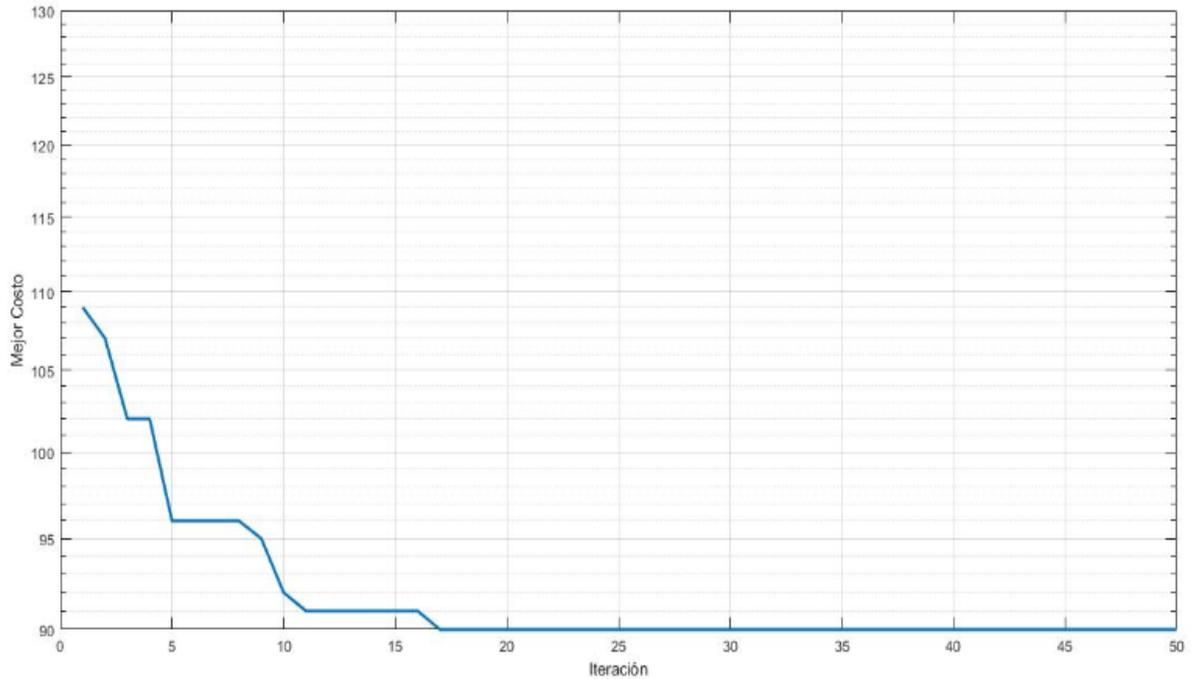
b. Función objetivo evaluada en las metaheurísticas (algoritmo armónico, algoritmo PSO del artículo, algoritmo PSO de la investigación).

Igualmente se realiza un comparativo donde se evalúa la función objetivo, con el fin de visualizar en términos de costo, número de iteraciones y tiempo para obtener el mínimo costo, al optimizar con el algoritmo armónico y el algoritmo PSO de la investigación, como se muestra en la tabla 24.

Tabla 24. Comparativo de resultados en costo-iteración-tiempo.

Ubicación	Función Objetivo Armónico (\$)	Función Objetivo Algoritmo PSO Investigación (\$)
1	6	6
2	7	7
3	8	8
4	8	8
5	8	8
6	7	7
7	9	9
8	8	8
9	8	8
10	8	8
11	7	7
12	6	6
Total (\$)	90	90
Iteración de convergencia	27	17
Tiempo (s)	3,21	43

Para el caso 2, la gráfica 2, es la obtenida en términos de convergencia con el uso del PSO de la investigación.



Gráfica 2. Gráfica de convergencia del PSO de investigación.

A nivel de gráfica de convergencia, se obtiene el mismo valor de la función objetivo en menor número de iteraciones. Aunque el programa corre en mayor tiempo, se identificó que a medida que se aumentaba el número de partículas en el enjambre, era posible reducir el tiempo del proceso iterativo.

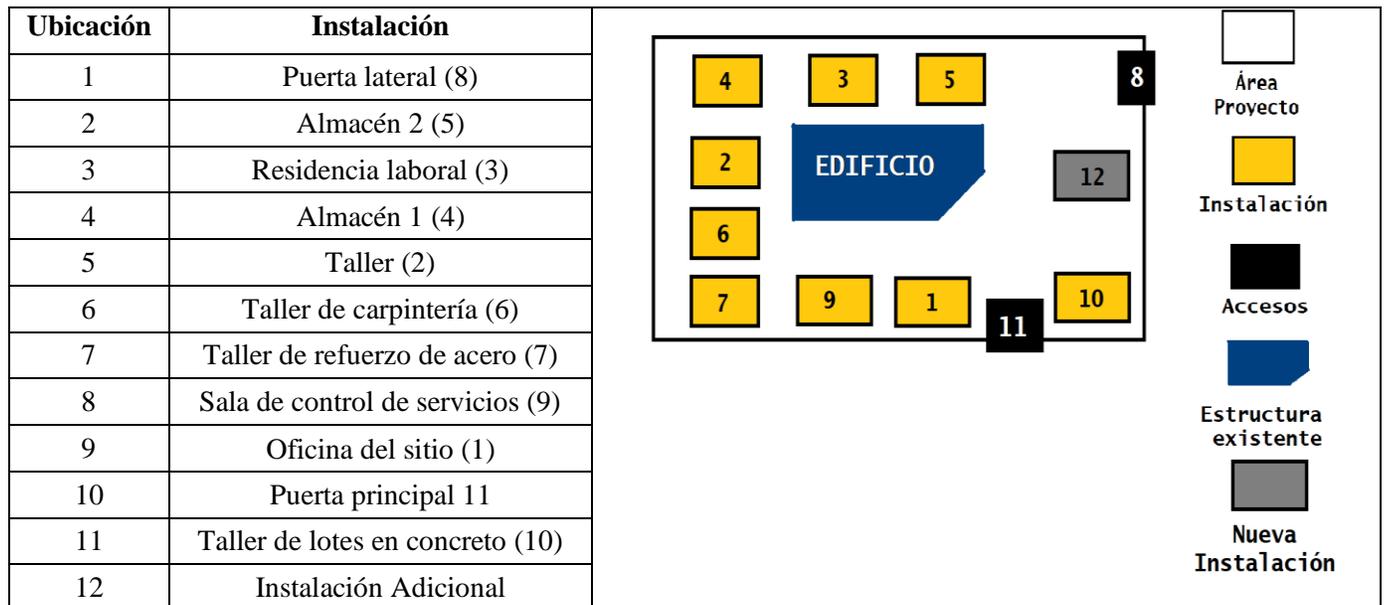
Caso 3

En cuanto a los resultados obtenidos, la asignación de instalaciones es la descrita en la tabla 25, los datos arrojados al optimizar con el algoritmo PSO de la investigación se relacionan en la tabla 26 y, la gráfica 3, da detalle del comportamiento en términos de convergencia.

a. Diseño de layout encontrado por el algoritmo PSO de la investigación.

Una vez culminado el proceso de optimización, se identifica que el algoritmo busca asignar la instalación 12, sobre la ubicación 12, dado que la estructura de matriz de distancia establecida reflejaba una afinidad entre los dos espacios. La tabla 25 muestra la asignación establecida con el algoritmo PSO de la investigación.

Tabla 25. Asignación de instalaciones con algoritmo PSO de la investigación.

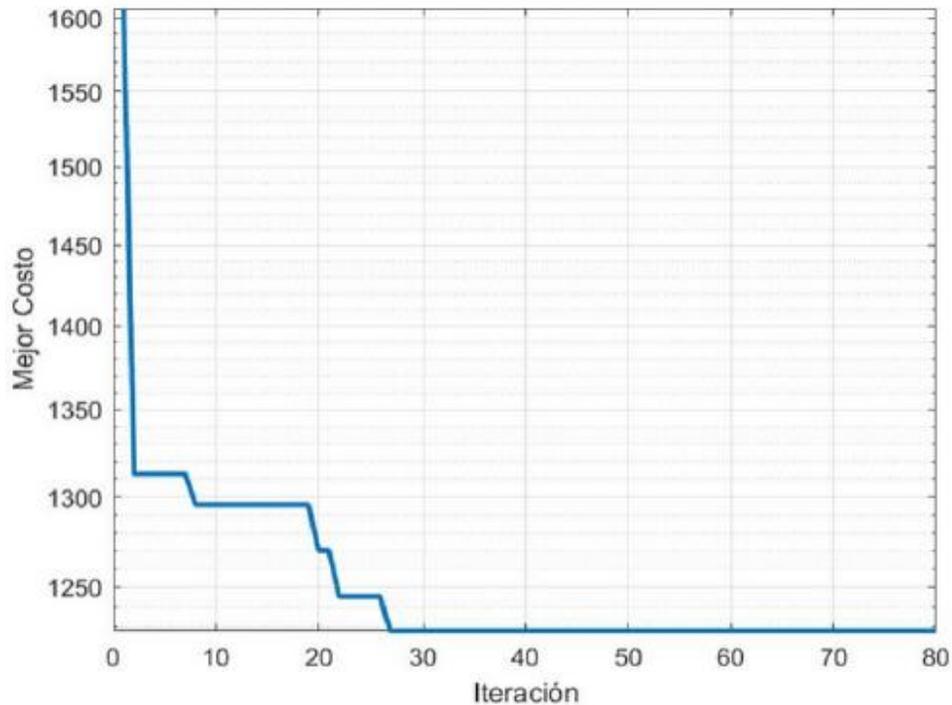


b. Función objetivo evaluada en las metaheurísticas (algoritmo armónico, algoritmo PSO del artículo, algoritmo PSO de la investigación).

Como parte del análisis de datos, para todos los casos estudiados se evalúa la función objetivo para cada asignación planteada como punto comparación para identificar si el diseño de layout es adecuado. En la tabla 26 se especifica los datos obtenidos al evaluar la función objetivo con el uso del algoritmo PSO de la investigación y en la gráfica 3, la convergencia.

Tabla 26. Resultados algoritmo PSO de la investigación

Ubicación	Función Objetivo Algoritmo PSO Investigación (\$)
1	27,5
2	112,5
3	100
4	100
5	112,5
6	100
7	100
8	190
9	135
10	25
11	125
12	100
Total (\$)	1227,5
Iteración de convergencia	28
Tiempo (s)	3,4



Gráfica 3. Gráfica de convergencia del PSO de investigación.

La asignación presentada comparada con los casos anteriores (caso 1 y caso 2) evidencia que para la minimización de la función objetivo la instalación 12 es asignada en la ubicación 12 como resultado de los valores de distancia que se le fueron asignados en la respectiva matriz, los cuales buscaban generar afinidad entre ubicación e instalación.

Por otra parte, con respecto al caso 1, el ejercicio propuesto logra una función de costo menor incluso con una instalación adicional, demostrando una gran eficiencia al momento de establecer el mejor diseño de un proyecto.

6.2 Ubicaciones predeterminadas. Número de ubicaciones mayor a número de instalaciones

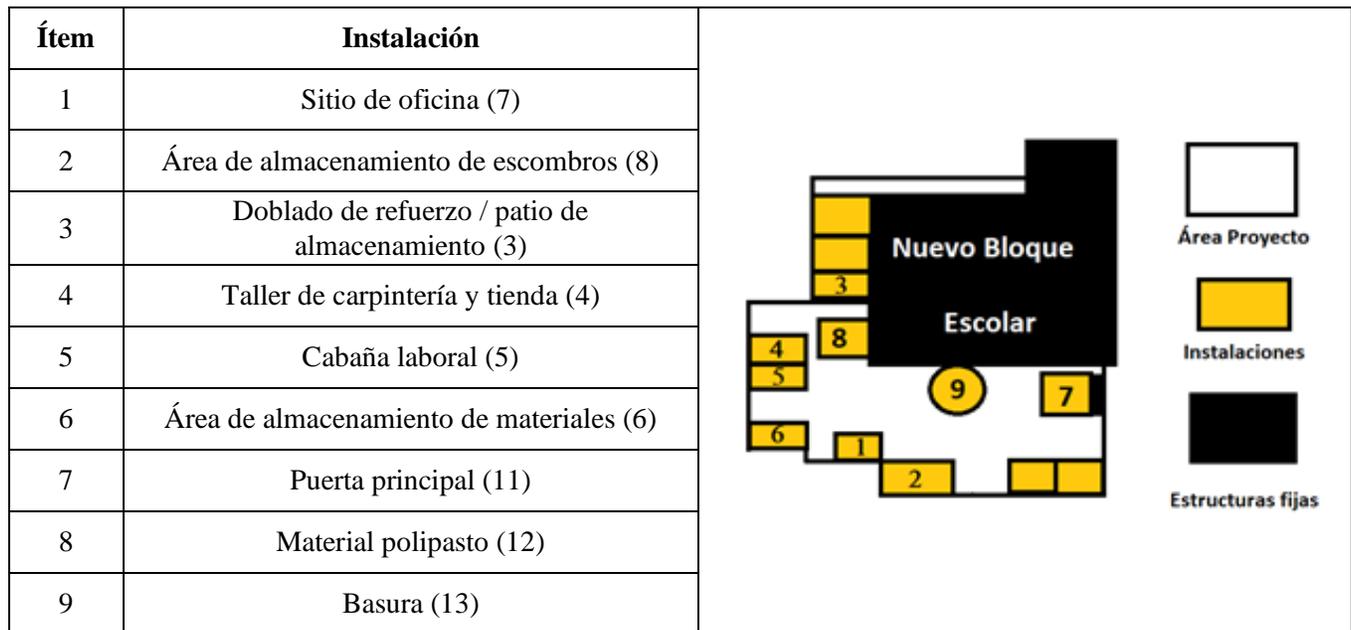
Caso 4

De acuerdo con el artículo empleado para el análisis el algoritmo de colonia de hormigas establece la siguiente asignación.

a. Diseño de layout encontrado por el artículo y el algoritmo PSO de la investigación.

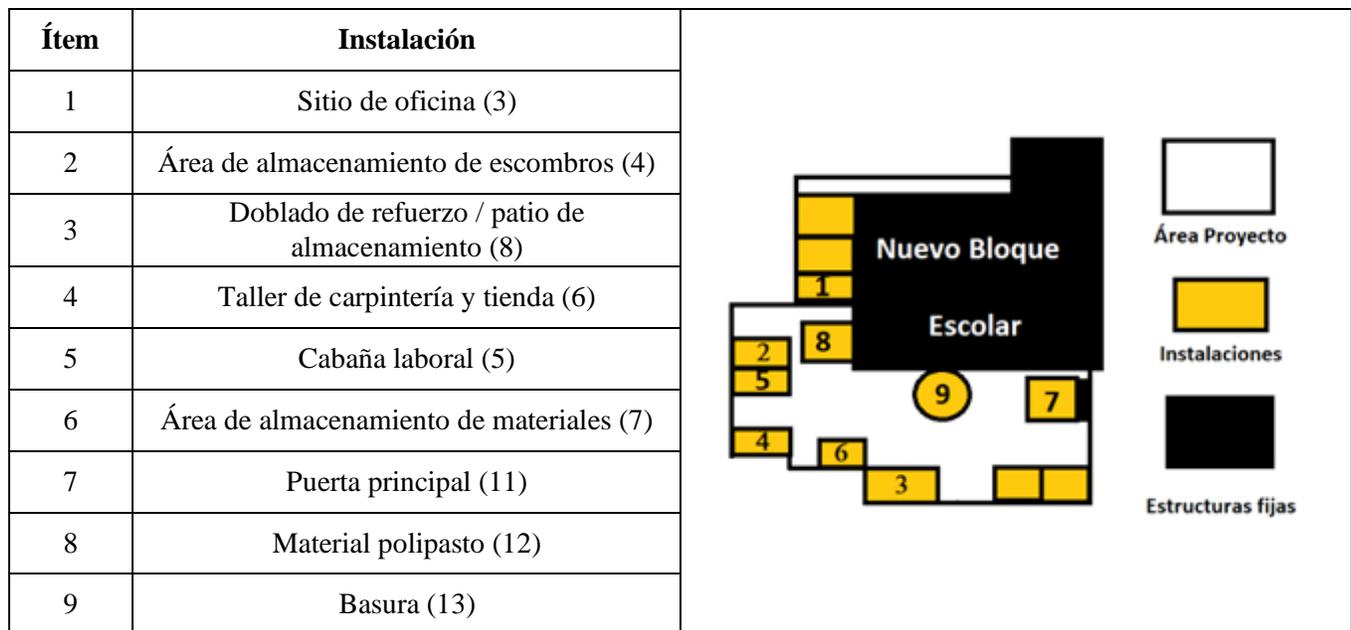
De acuerdo con el análisis de resultados, el algoritmo de colonia de hormigas determina una distribución que cumple con lo requerido y estipulado en el caso de estudio, solución detallada en la tabla 27.

Tabla 27. Solución planteada algoritmo colonia de hormigas (Lam et al., 2007).



Por otra parte, el PSO de la investigación entrega una asignación diferente, que igualmente cumple con las características, condiciones y restricciones solicitadas por el caso.

Tabla 28. Solución planteada por el PSO de la investigación.

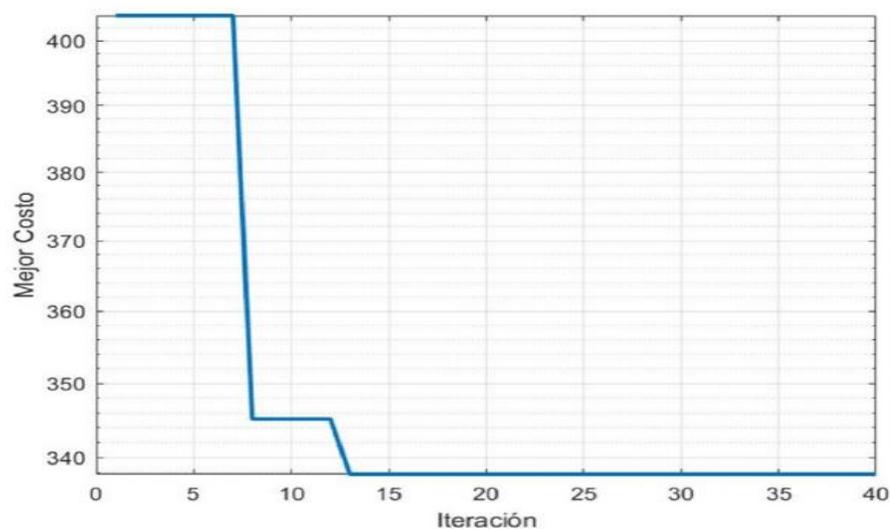


b. Función objetivo evaluada en las metaheurísticas (algoritmo de colonia de hormigas y algoritmo PSO de la investigación).

Para analizar en detalle los resultados con cada una de las metaheurísticas, se analiza la función objetivo para cada instalación. De los resultados de la tabla 29, se evidencia que existen diferentes asignaciones o diseños de layout que proporcionen un mismo costo en la función objetivo y que su convergencia haciendo uso del PSO de la investigación es obtenida en la iteración número 13.

Tabla 29. Resultados algoritmo de colonia de hormigas (Lam et al., 2007) y PSO de la investigación.

Ubicación	Función Objetivo Colonia de hormigas (\$)	Función Objetivo Algoritmo PSO Investigación (\$)
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	0,00	14,69
4	0,00	36,73
5	0,00	0,00
6	0,00	22,04
7	88,15	22,04
8	95,49	88,15
9	0,00	0,00
10	0,00	0,00
11	51,42	51,42
12	58,76	58,76
13	44,07	44,07
Total (\$)	337,89	337,89
Iteración de convergencia	-	13



Gráfica 4. Gráfica de convergencia del PSO de la investigación.

De acuerdo con los resultados y gráfica de convergencia obtenidos, se presenta un ejercicio de múltiples soluciones que igualmente alcanzan un mismo valor de función objetivo. Nuevamente se resalta la importancia de limitar el proyecto mediante las restricciones para propiciar un algoritmo que logre alcanzar una única solución.

Caso 5

a. Diseño de layout encontrado por el artículo y el algoritmo PSO de la investigación.

A continuación, en las tablas 30 y 31, se evidencia la asignación del algoritmo de colonias de hormigas y el PSO de la investigación, en los cuales se proponen diferentes diseños que cumplen con los parámetros y soluciones solicitados por el problema en cuestión.

Tabla 30. Solución planteada algoritmo colonia de hormigas.

Instalación	Instalación/Ubicación
1	Sitio de oficina (9)
2	Área de almacenamiento de escombros (8)
3	Doblado de refuerzo / patio de almacenamiento (4)
4	Taller de carpintería y tienda (7)
5	Cabaña laboral (5)
6	Área de almacenamiento de materiales (6)
7	Puerta principal (11)
8	Material polipasto (12)
9	Basura (13)

Tabla 31. Solución planteada algoritmo PSO investigación.

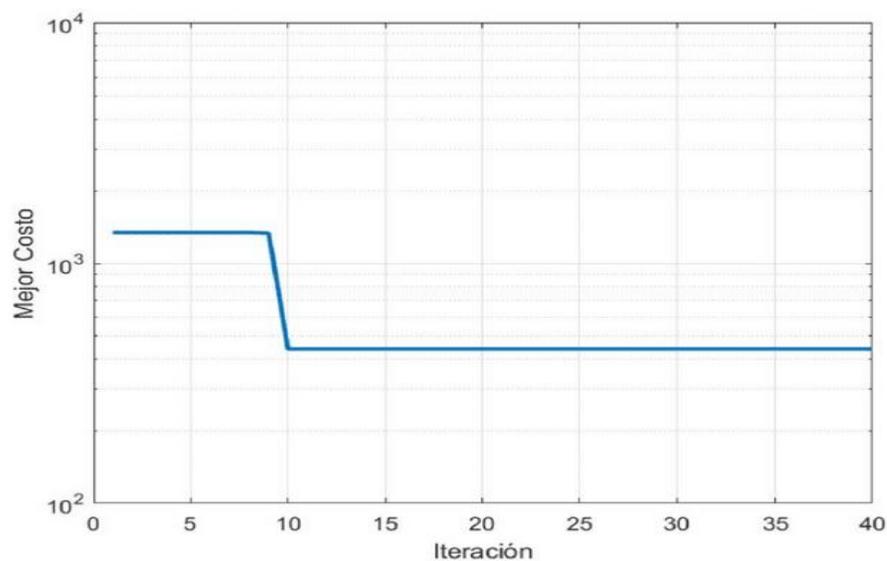
Instalación	Instalación /Ubicación
1	Sitio de oficina (9)
2	Área de almacenamiento de escombros (8)
3	Doblado de refuerzo / patio de almacenamiento (4)
4	Taller de carpintería y tienda (5)
5	Cabaña laboral (6)
6	Área de almacenamiento de materiales (7)
7	Puerta principal (11)
8	Material polipasto (12)
9	Basura (13)

b. Función objetivo evaluada en las metaheurísticas (algoritmo de colonia de hormigas y algoritmo PSO de la investigación).

La tabla 32, establece un comparativo entre la metaheurística del artículo guía del caso y el PSO de investigación, donde es posible identificar que se genera una asignación de instalación diferente en la ubicación 7, causando una reducción significativa del costo; la gráfica 5 refleja en términos de convergencia el comportamiento del PSO de la investigación.

Tabla 32. Comparativo de resultados algoritmo de colonia de hormigas-PSO investigación.

Ubicación	Función Objetivo Colonia de hormigas (\$)	Función Objetivo Algoritmo PSO Investigación (\$)
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	0,00	0,00
4	29,38	29,38
5	0,00	7,35
6	0,00	14,69
7	51,42	22,04
8	95,49	95,49
9	117,53	117,53
10	0,00	0,00
11	51,42	51,42
12	58,76	58,76
13	44,07	44,07
Total (\$)	448,08	440,73
Iteración de convergencia	-	10



Gráfica 5. Gráfica de convergencia del PSO de investigación.

El PSO de la investigación obtuvo mejores resultados en términos de función objetivo, aunque no se menciona en el artículo del caso de la colonia de hormigas (Pan, Wu, Hou, & Feng, 2016) la iteración de convergencia, se considera que la iteración de respuesta del trabajo de investigación es adecuada (baja en comparación con los casos analizados) para el problema de estudio.

Caso 6

Implementando la propuesta de diseño de los investigadores, se obtiene la siguiente asignación de instalaciones en el proyecto.

a. Diseño de layout encontrado por el algoritmo PSO de la investigación.

A continuación, la tabla 33, evidencia la asignación del algoritmo PSO de investigación cuando se adiciona una celda o ubicación adicional al proyecto de construcción

Tabla 33. Solución planteada algoritmo PSO de investigación.

Ítem	Instalación
1	Sitio de oficina (7)
2	Área de almacenamiento de escombros (4)
3	Doblado de refuerzo / patio de almacenamiento (3)
4	Taller de carpintería y tienda (5)
5	Cabaña laboral (6)
6	Área de almacenamiento de materiales (8)
7	Puerta principal (12)
8	Material polipasto (13)
9	Basura (14)

b. Función objetivo evaluada en las metaheurística PSO de investigación.

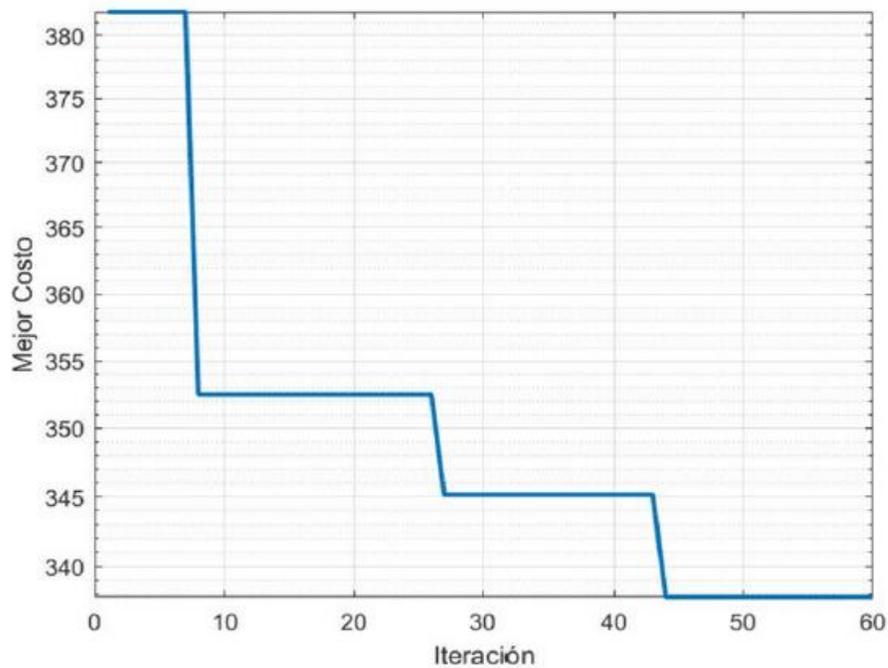
Con el propósito de identificar el comportamiento de cada una de las instalaciones en su respectiva ubicación, se realiza un análisis de la función objetivo para cada punto. Este tipo de análisis resulta de gran utilidad ya que evidencia la importancia o impacto que genera determinadas asignaciones establecida durante el proceso de optimización. En casos anteriores, es un punto de comparación entre metaheurísticas y diseños de layout propuestos.

Los resultados obtenidos al evaluar la función objetivo para este caso están relacionados en la siguiente tabla:

Tabla 34. Resultados algoritmo PSO investigación.

Ubicación	Función Objetivo
1	0,00
2	0,00
3	0,00
4	36,73
5	7,35
6	14,69
7	88,15
8	36,73
9	0,00
10	0,00
11	0,00
12	51,42
13	58,76
14	44,07
Total (\$/m)	337,89

En la gráfica 6 se visualiza su comportamiento en términos de convergencia



Gráfica 6. Gráfica de convergencia del PSO de la investigación.

Este caso propuesto, nos permite visualizar que la nueva ubicación establecida dentro del proyecto no representa una posible celda de asignación de instalaciones, dado que no genera una reducción en la función objetivo. Como parte de la investigación, se realizaron una serie de modificaciones en los datos de ingreso del proyecto (reducir número de iteraciones a menos de 100 y de partículas entre 10 a 15 unidades) que disminuían la calidad de la muestra y del proceso, con el fin de buscar una asignación de la celda. El resultado obtenido generó un incremento de la función a más o menos \$448 USD y se asignaban instalaciones en la nueva celda.

6.3 Ubicaciones no predeterminadas

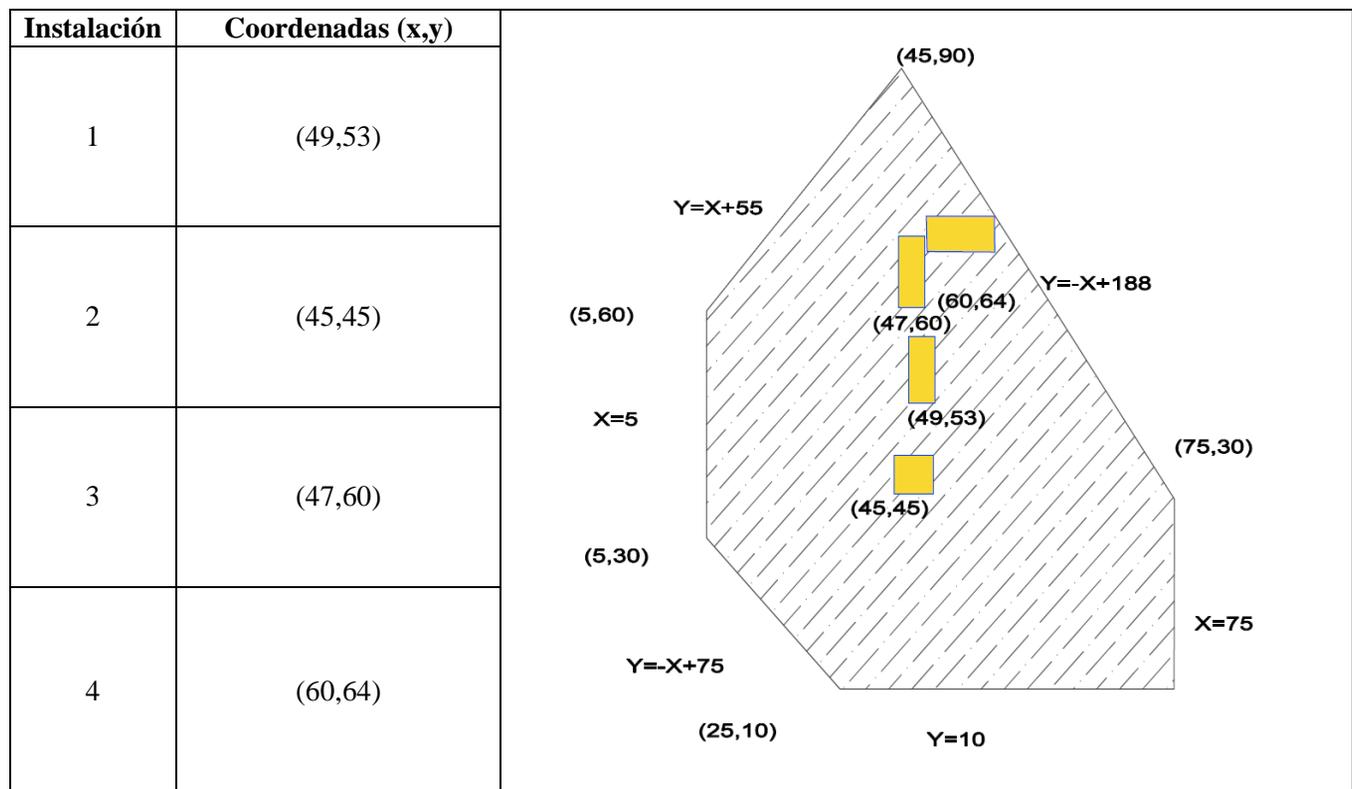
Caso 7

De acuerdo con la literatura, mediante el uso del algoritmo genético es posible obtener la siguiente asignación para un porcentaje de mutación de 5% (Osman et al., 2003).

a. Diseño de layout encontrado por el algoritmo PSO de la investigación.

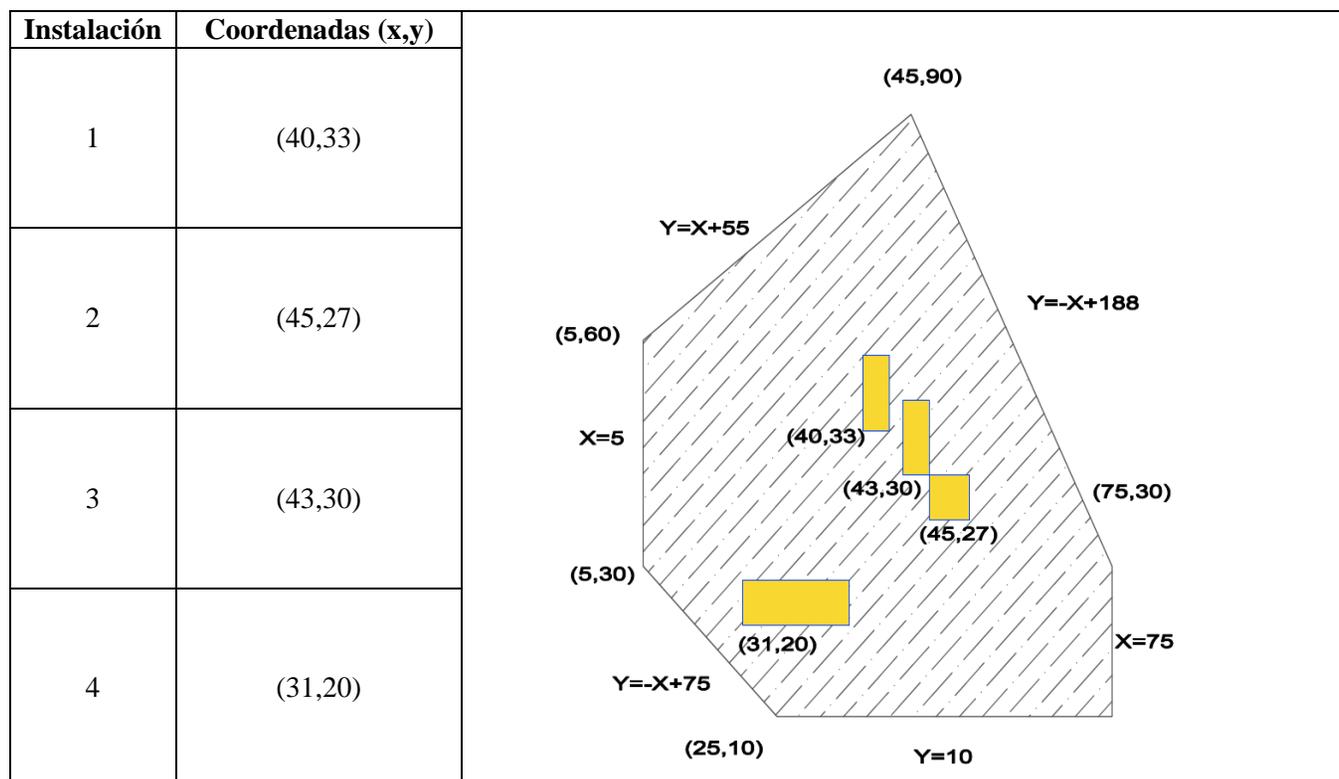
El algoritmo genético al igual que el PSO de la investigación (tabla 35-tabla 36), buscan la agrupación de sus instalaciones con el propósito de reducir las distancias entre instalaciones).

Tabla 35. Solución planteada por el algoritmo genético del artículo. (Osman et al., 2003)



La asignación de instalaciones descrita en la tabla 36 del PSO de la investigación, generó un diseño de menor costo por metro (distancia entre instalación), que el del algoritmo genético del artículo guía, lo cual, evidencia el alto rendimiento del algoritmo, generando una reducción con respecto al valor base (artículo guía) de más o menos del 30% (figura 6).

Tabla 36. Solución planteada por el algoritmo de investigación.



b. Matrices de distancia entre instalaciones.

Una vez realizado el análisis de optimización se construye la matriz de distancias tanto para el artículo guía (tabla 37), como para el PSO de investigación (tabla 38). De acuerdo con esto es posible identificar que se alcanza la mínima distancia para el algoritmo PSO de la investigación con un valor de 3,60m, entre las instalaciones 2 y 3.

Tabla 37. Matriz de distancia entre instalaciones algoritmo genético.

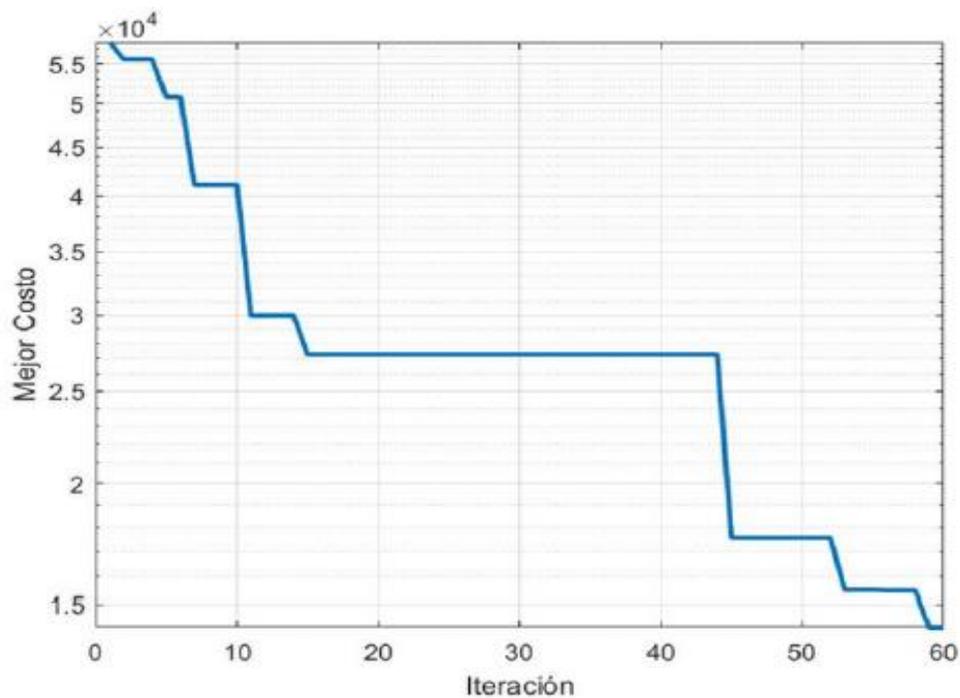
Instalación	1	2	3	4
1	0	8,94	7,28	15,55
2	8,94	0	15,33	24,20
3	7,28	15,13	0	13,60
4	15,55	24,20	13,60	0

La matriz de distancia en el artículo consultado no se encontraba especificada en la lectura, pero fue calculada por los investigadores como parte del análisis de los resultados, ver tabla 38.

Tabla 38. Matriz de distancia entre instalaciones algoritmo PSO de investigación.

Instalación	1	2	3	4
1	0	7,81	4,24	16,09
2	7,81	0	3,61	15,81
3	4,24	3,61	0	15,84
4	16,09	15,81	15,84	0

La función objetivo, evaluada en términos de convergencia, utilizando el PSO de la investigación arrojó un costo de \$14.203,83 USD en la iteración 59. En el caso del algoritmo genético del artículo se alcanza el menor costo de \$20.100 USD en la iteración 190. Como se evidencia en los gráficos de la tabla 35 y 36, la aglomeración de las instalaciones es la respuesta más coherente en la búsqueda de reducir distancias entre las mismas.



Gráfica 7. Gráfica de convergencia del PSO de la investigación.

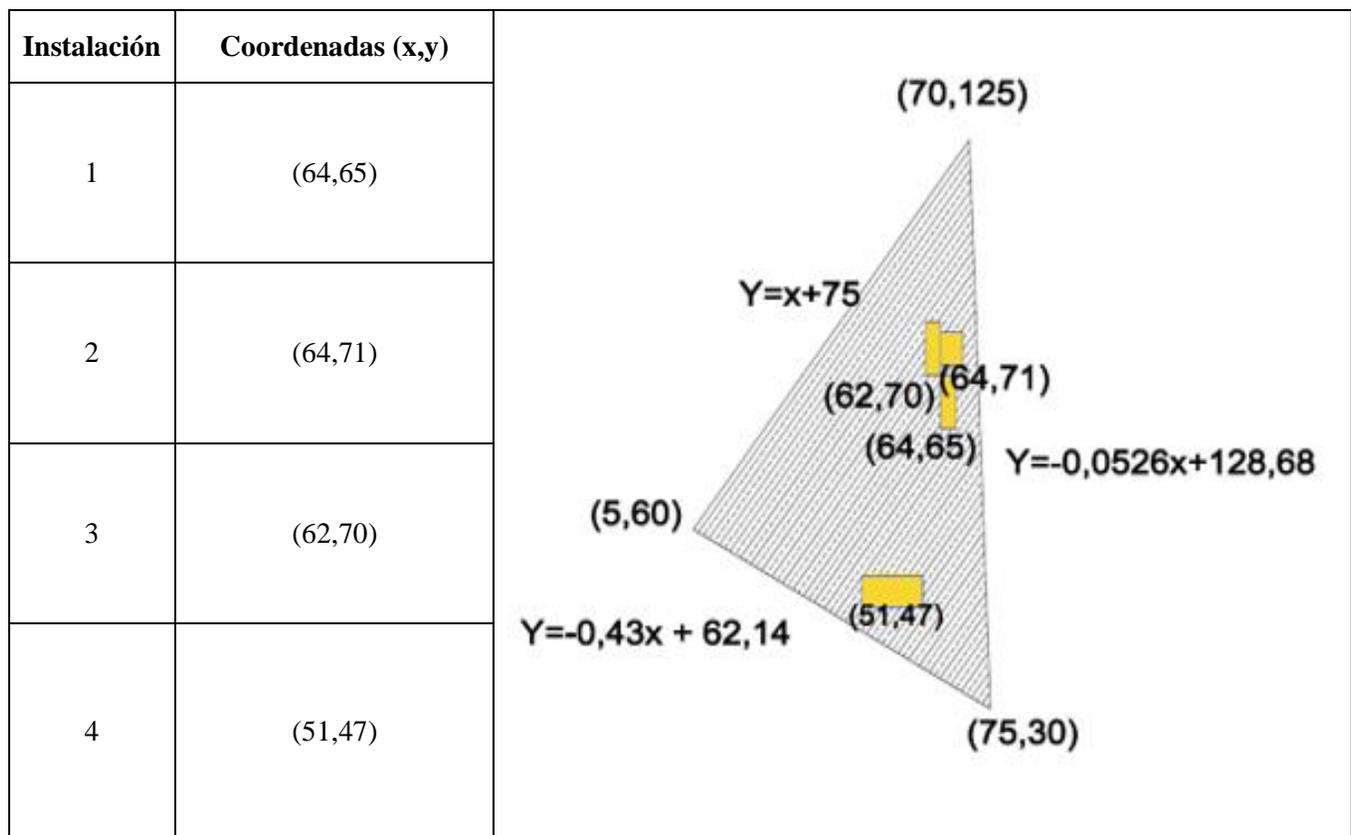
Caso 8

De acuerdo con la propuesta de los investigadores, modificando la geometría del proyecto a un área triangular, se obtiene la siguiente asignación.

a. Diseño de layout encontrado por el algoritmo PSO de la investigación.

A continuación, se evidencia la asignación de las instalaciones entregadas por el algoritmo PSO de investigación en una geometría triangular. Como se observa en la tabla 39, para minimizar la función objetivo, el algoritmo busca agrupar las instalaciones en un mismo sector del área del proyecto, disminuyendo así la distancia entre las mismas.

Tabla 39. Solución planteada por el algoritmo PSO de la investigación.



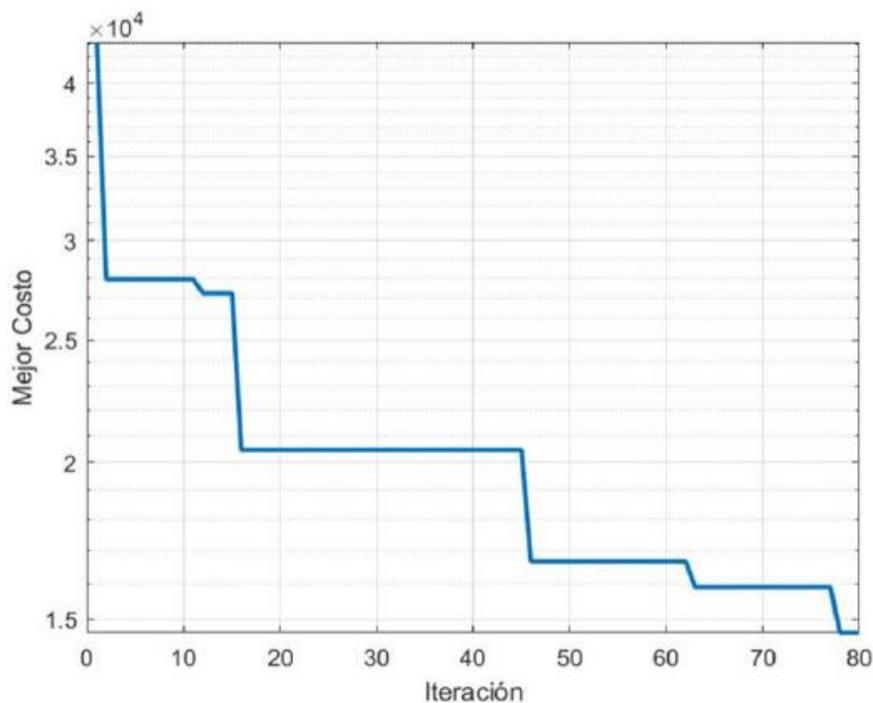
b. Matrices de distancia entre instalaciones

Como parte del proceso de optimización se requiere analizar la matriz de distancia. Como se muestra a continuación, los valores de la matriz de la tabla 40, son calculados mediante la hipotenusa entre coordenadas.

Tabla 40. Matriz de distancia entre instalaciones algoritmo PSO de investigación.

Instalación	1	2	3	4
1	0	6	5,3852	22,309
2	6	0	2,2361	27,4002
3	5,3852	2,2361	0	25,6033
4	22,309	27,4002	25,6033	0

La geometría propuesta arroja un valor de función objetivo de \$/m 14.634,09, en la iteración 78 (Ver gráfica 8). Por otra parte, se evidencio que es posible reducir la función objetivo ampliando el número de partículas en el enjambre y ampliando la cantidad de iteraciones en el análisis. La mínima distancia obtenida entre instalaciones se brinda entre los espacios 1 y 3, con un valor de hipotenusa de 2,23 (unidades). Por el contrario, la mayor distancia se encuentra entre las instalaciones 2 y 4 con un valor de 27,40 (unidades). Cabe resaltar que la instalación 4, tiende a ser la ubicación más lejana dentro del layout dadas sus dimensiones, al tener los valores más altos en el lado x y, y el algoritmo busca que quede lo más separada para evitar posibles problemas de superposición entre las instalaciones.



Gráfica 8. Gráfica de convergencia PSO de la Investigación. Fuente: Propia,2019.

7. DISCUSIONES

La figura mostrada a continuación, representa gráficamente la disminución de la función objetivo para cada caso estudiado dependiendo de la metaheurística empleada en el mismo. De acuerdo con los datos recopilados, se evidencia que las reducciones significativas respecto al algoritmo PSO de la investigación se presentan en el caso 1 (54,29%), caso 5 (98,36%) y caso 7 (70,67%).

Como conclusión de lo anterior, el impacto de esta herramienta en los casos implementados hace que sea factible considerarla como instrumento de optimización de procesos en el sector de la construcción, lo que implicaría una reducción en costos y tiempo dentro de los proyectos.

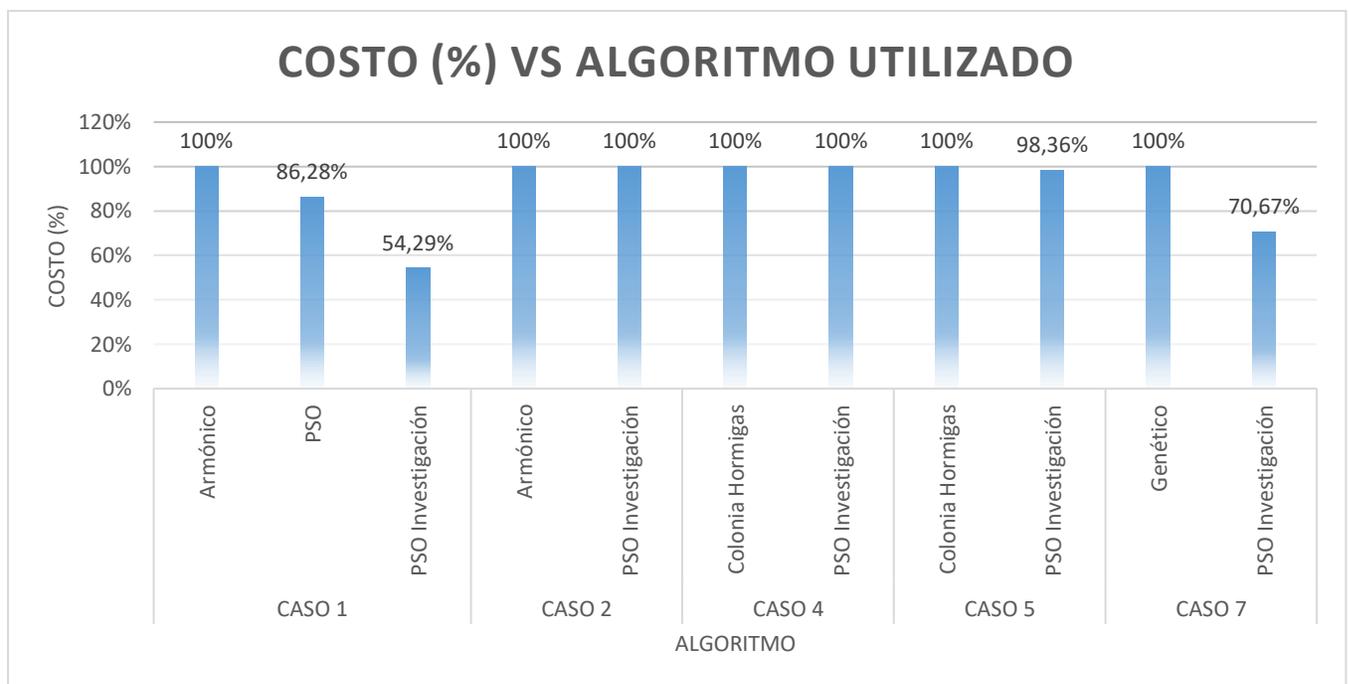


Figura 7. Comparativo Costo (%) – Algoritmo utilizado.

UBICACIONES PREDETERMINADAS - INSTALACIONES IGUAL A NÚMERO DE UBICACIONES.

1. El desempeño del algoritmo de investigación arrojó mejores resultados en términos de convergencia, número de iteraciones y tiempo en la búsqueda de respuesta, así mismo minimización de la función objetivo en comparación con el algoritmo armónico y el algoritmo PSO del artículo (Zhang & Wang, 2008). Es relevante mencionar que en los artículos no se menciona que la rapidez o eficacia en la búsqueda de una mejor respuesta y la convergencia estén asociadas al tipo de equipo o herramienta empleada, por el contrario, se menciona que depende de los parámetros del algoritmo (algoritmo armónico) o el número de elementos en el enjambre o población (algoritmo PSO).

2. El algoritmo PSO de la investigación demostró alta eficiencia en los valores de la función objetivo al encontrar mejores resultados en menor tiempo, esto a nivel de la industria, puede representar ventajas considerables dado que entre mayor número de instalaciones o de espacios (más robustez en el problema), la metaheurística propuesta puede permitir al usuario obtener una alternativa en un tiempo razonable.
3. Los resultados positivos en las ubicaciones predeterminadas y en general para la investigación, es asociada en gran parte al código de programación diseñado, el cual buscaba verificar temas de restricciones para el problema (como dimensiones de ubicaciones e instalaciones) y así permitir al proceso de investigación avanzar en la búsqueda de un mejor resultado a partir de un diseño inicial que cumple con los criterios del ejercicio.
4. Aunque se obtiene el mismo valor para la función objetivo (caso 2), se identifica en la gráfica de convergencia que el algoritmo de investigación logra la obtención de la respuesta óptima en un mayor número de iteraciones. Como resultado de los datos obtenidos, y al observar que existen soluciones multiobjetivo (varios posibles diseños de layout con un mismo valor de función objetivo) se recomienda dentro de la investigación plantear para los casos de estudio o proyectos en los que se implemente la herramienta, un número considerable de parámetros y elementos que limiten el ejercicio, lo contextualicen y permitan poner a prueba esta y muchas otras metaheurísticas.
5. Los parámetros del algoritmo PSO no se modifican en ninguno de los casos, dado que se implementan los sugeridos por la literatura y que de acuerdo con esta permiten una mejor convergencia del algoritmo (Nieto, 2006). Por otra parte, se modifica el número de partículas o elementos en el enjambre (al igual que el artículo del caso 1, que emplea un PSO similar (Zhang & Wang, 2008)), donde es posible observar que a mayor número de partículas menor es la iteración de convergencia del proceso de optimización.
6. La asignación de una celda e instalación adicional (caso 3), no generó una redistribución de los espacios donde se asignará una instalación (diferente a la nueva) sobre la ubicación o celda creada. Aunque cabe resaltar que la nueva asignación creada por el algoritmo, donde se tiene una instalación y celda más que el caso 1, brinda un resultado que incluso a nivel de función objetivo es menor que la propuesta del artículo con un algoritmo armónico.

UBICACIONES PREDETERMINADAS - NÚMERO DE UBICACIONES MAYOR A NÚMERO DE INSTALACIONES.

1. Al adaptar el algoritmo PSO al caso de optimizaciones de colonia de hormigas, es posible identificar que para los tres casos se obtiene un resultado igual o mejor al propuesto por el artículo en cuestión. Se considera necesario como parte de análisis y conclusiones de la investigación, adicionar e implementar más restricciones y parámetros dentro del problema analizado, que permitan visualizar cuál de las metaheurísticas le convienen más a este tipo de situaciones.
2. En cuanto al caso 2, una vez realizado el proceso de optimización y comparado con el artículo (Lam et al., 2007), se identifica que es posible obtener un resultado mejor en términos de función objetivo. Igualmente, es una asignación que cumple con las restricciones tanto en instalaciones fijas como en instalaciones penalizadas.
3. A partir de la función objetivo del caso, se infiere la importancia del criterio del director de proyecto y su equipo de trabajo, dado que los índices de la función de frecuencia deben ser establecidos a partir de la experticia y conocimientos de las personas involucradas y los interesados.
4. El análisis del (caso 3), evidencia que el algoritmo, una vez adicionada una celda e instalación nueva dentro del proyecto, puede brindar una opción de diseño de layout que cumple con las restricciones y parámetros requeridos y que incluso, puede obtener una función objetivo de igual valor que una distribución de espacios con menor número de elementos o instalaciones.

UBICACIONES NO PREDETERMINADAS

1. El algoritmo PSO de investigación brinda una asignación de instalaciones sobre el terreno con una función objetivo de menor valor. Adicionalmente, se cumplen las restricciones en términos de límites del proyecto y superposición de instalaciones.
2. Por otra parte, en términos de convergencia, es posible obtener un valor menor con número más bajo de iteraciones. Lo anterior, es un claro ejemplo de la eficacia de la metaheurística planteada.
3. El caso 1 y 2 de las ubicaciones no predeterminadas, evidencian el funcionamiento del algoritmo dentro del proceso de investigación, revisando las tablas 36 y 39, es posible observar como la metaheurística busca la aglomeración de los elementos, un comportamiento coherente dado que esto implica una reducción de las distancias ente las instalaciones existentes.

8. CONCLUSIONES

El trabajo de investigación es sin lugar a duda una gran oportunidad dentro del campo de la construcción para implementar una alternativa de optimización en el diseño de layout de obra. Teniendo en cuenta los datos y resultados obtenidos, se evidencia la amplia posibilidad de obtener otras alternativas de diseño que igualan o superan diferentes metaheurísticas como el algoritmo genético, algoritmo de colonia de hormigas o armónico.

Aunque el proyecto llevado a cabo brindó una respuesta positiva a la hipótesis planteada, el problema posee algunas limitantes como la necesidad del criterio y conocimiento del director del proyecto o de los profesionales involucrados. Esto se debe en gran medida a las restricciones y características de cada problema de construcción, dado que se modifican o conciben de una manera diferente dependiendo del caso. De acuerdo con esto los involucrados deben establecer, definir y priorizar las restricciones y variables de cada una de las obras de edificación a ejecutar.

Por otra parte, el plantear casos para los tres tipos de ubicaciones dejaron en evidencia diferentes comportamientos del algoritmo, como, por ejemplo, la necesidad de una muestra (población e iteraciones) considerable y coherente que genere un proceso de calidad y que permita obtener mejores resultados.

Por tanto, el siguiente paso dentro de la investigación consiste en la implementación de la metaheurística y la herramienta computacional en un problema de construcción real, donde se involucre la experticia del equipo de profesionales y así se identifiquen los diferentes parámetros, variables y restricciones que componen cada proceso de construcción de edificaciones, esperando una asignación y diseño de layout que represente ganancias significativas en costo y tiempo para el constructor.

A nivel de objetivos planteados, se puede concluir lo siguiente:

Parámetros y restricciones de los casos

- El estudio detallado de los casos en la búsqueda de datos, variables, parámetros y restricciones de estos, permiten que se realice un acople efectivo del algoritmo PSO de la investigación, para así, obtener resultados veraces y precisos dentro del proceso de optimización.

Función Objetivo, gráfico de convergencia y número de iteraciones:

- Para los diferentes casos propuestos en su mayoría se obtienen mejores resultados en términos de gráfica de convergencia, función objetivo y número de iteraciones. Esto como resultado de la programación propuesta para iteración cero con menor número de errores, entre otros aspectos, como la población empleada en el análisis de la información (30 a 50 partículas).

Herramienta Computacional y Código de programación:

- Para cada uno de los casos, su código de programación posee un elemento dentro del mismo que todos los ejemplos comparten. Esta sección es precisamente la relacionada con el algoritmo PSO, el cual, es una estructura que no se modifica para ninguno de los problemas.
- Los verdaderos cambios en el proceso de optimización radican en las características de cada uno de los problemas, en términos de función objetivo, variables y parámetros de diseño y las correspondientes restricciones.

De acuerdo con lo anterior, el proyecto de investigación da una base a futuras implementaciones del tema propuesto en el sector de la construcción, por lo cual, a partir de la experticia y el criterio del director y del personal involucrado será posible identificar e inferir temas de restricciones, variables y parámetros de los proyectos para aplicar posteriormente un análisis de diseño de layout sobre los mismo que permita generar una reducción en términos de costos y cronograma de estos.

9. ANEXOS

Anexo 1. Instructivo de formato de lecturas.

Anexo 2. Formato de lecturas.

Anexo 3. Registro de lecturas.

Anexo 4. Instructivo herramienta computacional.

Anexo 5. Código caso 1.

Anexo 6. Código caso 2.

Anexo 7. Código caso 3.

Anexo 8. Código caso 4 y 5.

Anexo 9. Código caso 6.

Anexo 10. Código caso 7.

Anexo 11. Código caso 8.

Referencias

- Farmakis, P. M., & Chassiakos, A. P. (2017). Dynamic multi-objective layout planning of construction sites. *Procedia Engineering*.
- Garcia Nieto, J. M. (2006). *Algoritmos Basados en Cúmulos de Partículas Para la Resolución de Problemas Complejos*.
- Lam et al. (2007). The application of the ant colony optimization algorithm to the construction site layout planning problem. *Construction Management and Economics*, 359-374.
- Li, H., & Love, P. (1998). SITE-LEVEL FACILITIES LAYOUT USING GENETIC ALGORITHMS. *Journal of Computing in Civil Engineering*.
- Mawdesley, M. J., Al-jibouri, S. H., & Yang, H. (2002). Genetic Algorithms for Construction Site Layout. *Journal of Construction Engineering and Management*.
- Osman, H. M., Georgy, M. E., & Ibrahim, M. E. (2003). A hybrid CAD-based construction site layout planning system using genetic algorithms. *Automation in Construction*.
- Pejman Alanjari, SeyedReza Razavi Alavi, Simaa AbouRizk. (2014). Material and facility layout planning in construction projects using simulation. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*.
- Prayogo, D., Sutanto, J., Suryo, H., & Eric, S. (2018). A Comparative Study on Bio-Inspired Algorithms in Layout Optimization of Construction Site Facilities. *Civil Engineering Dimension*.
- RazaviAlavi, S., & AbouRizk, S. (2017). Site Layout and Construction Plan Optimization Using an. *Journal of Computing in Civil*.
- Sadeghpour, F., Moselhi, O., & Alkass, S. T. (2006). Computer-Aided Site Layout Planning. *Journal of Construction Engineering and Management*.
- Sanad, H., Ammar, M. A., & Ibrahim, M. E. (2008). Optimal Construction Site Layout Considering Safety and Environmental Aspects. *Journal of Construction Engineering and Management*.
- Tommelein, I., Levitt, R. E., & Hayes-Roth, B. (1992). SITE-LAYOUT MODELING: HOW CAN ARTIFICIAL INTELLIGENCE HELP. *Journal of Construction Engineering and Management*.
- Wang, M.-J., Hu, M. H., & Ku, M.-Y. (2005). A solution to the unequal area facilities layout problem by genetic algorithm. *Computers in Industry*.
- Wolpert, D. H., & Macready, W. G. (1997). No Free Lunch Theorems for Optimization. *IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION*.
- Zhang, H., & Wang, J. Y. (2008). Particle Swarm Optimization for Construction Site. *Journal of Construction Engineering and Management*.
- Gholizadeh, Roozbeh., Amiri, Gholamrez., & Mohebi Benyamin. (2010). An alternative approach to a harmony search algorithm for a construction site layout problem. *Research Press*.

ÍNDICE DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1. Geometría con número de ubicaciones igual a número de instalaciones	7
Figura 2. Geometría proyecto con varias celdas para asignación de instalaciones.....	8
Figura 3. Restricciones comunes en ubicaciones no predeterminadas.	9
Figura 4. Diagrama de flujo algoritmo PSO.	12
Figura 5. Matriz de pesos de cercanía entre instalaciones.(Osman et al., 2003).	27
Figura 6. Matriz de pesos de cercanía entre instalaciones. (Osman et al., 2003)	28
Figura 7. Comparativo Costo (%) – Algoritmo utilizado.....	49

ÍNDICE DE TABLAS

	<u>Pág.</u>
Tabla 1. Instalaciones para caso 1. Fuente: (Gholizadeh et al., 2010).....	17
Tabla 2. Matrices de frecuencia, distancia y costo. Fuente: (Gholizadeh et al., 2010).....	18
Tabla 3. Dimensiones de las instalaciones. Fuente: (Zhang & Wang, 2008).....	19
Tabla 4. Dimensiones de las ubicaciones. Fuente: (Zhang & Wang, 2008).....	19
Tabla 5. Lista de instalaciones caso 2. Fuente: (Gholizadeh et al., 2010).....	20
Tabla 6. Dimensiones de las instalaciones. Fuente: (Zhang & Wang, 2008).....	20
Tabla 7. Dimensiones de las ubicaciones. Fuente: (Zhang & Wang, 2008).....	20
Tabla 8. Matrices de costo de construcción, costo interactivo adyacencia y asignación de instalaciones. Fuente: Gholizadeh et al., 2010).....	21
Tabla 9. Matriz de frecuencia, distancia y costo. Modificación a los datos.	22
Tabla 10. Dimensiones de las instalaciones. Fuente: (Zhang & Wang, 2008)	23
Tabla 11. Dimensiones de las ubicaciones. Fuente: (Zhang & Wang, 2008).....	23
Tabla 12. Asignación y estructura inicial del proyecto. Fuente: (Lam et al., 2007)	24
Tabla 13. Matriz de distancia entre instalaciones y penalización de celdas. Fuente: (Lam et al., 2007)	24
Tabla 14. Índices de importancia – pesos de índices. Fuente: (Lam et al., 2007)	25
Tabla 15. Matriz de distancia entre instalaciones, adición fila 11 (nueva ubicación).	25
Tabla 16. Asignación y estructura inicial del proyecto. Fuente: (Osman et al., 2003).	26
Tabla 17. Geometría propuesta.....	28
Tabla 18. Layout de obra optimizado con algoritmo armónico. Fuente: (Gholizadeh et al., 2010)	29
Tabla 19. Layout de obra optimizado con algoritmo PSO artículo. Fuente:(Zhang & Wang, 2008)	30

Tabla 20. Layout de obra optimizado con el PSO propuesto en la investigación.....	30
Tabla 21. Comparativo de resultados en costo-iteración-tiempo.	31
Tabla 22. Asignación óptima de instalaciones con algoritmo armónico caso 2. Fuente (Amiri et al., 2012)	33
Tabla 23. Asignación de instalaciones con algoritmo PSO de la investigación.	34
Tabla 24. Comparativo de resultados en costo-iteración-tiempo.	34
Tabla 25. Asignación de instalaciones con algoritmo PSO de la investigación.	36
Tabla 26. Resultados algoritmo PSO de la investigación	36
Tabla 27. Solución planteada algoritmo colonia de hormigas (Lam et al., 2007).	38
Tabla 28. Solución planteada por el PSO de la investigación.	38
Tabla 29. Resultados algoritmo de colonia de hormigas (Lam et al., 2007) y PSO de la investigación.	39
Tabla 30. Solución planteada algoritmo colonia de hormigas.....	40
Tabla 31. Solución planteada algoritmo PSO investigación.	40
Tabla 32. Comparativo de resultados algoritmo de colonia de hormigas-PSO investigación. ...	41
Tabla 33. Solución planteada algoritmo PSO de investigación.....	42
Tabla 34. Resultados algoritmo PSO investigación.....	43
Tabla 35. Solución planteada por el algoritmo genético del artículo. (Osman et al., 2003)	44
Tabla 36. Solución planteada por el algoritmo de investigación.....	45
Tabla 37. Matriz de distancia entre instalaciones algoritmo genético.....	45
Tabla 38. Matriz de distancia entre instalaciones algoritmo PSO de investigación.	46
Tabla 39. Solución planteada por el algoritmo PSO de la investigación.....	47
Tabla 40. Matriz de distancia entre instalaciones algoritmo PSO de investigación.	48