

# Búsqueda por Entornos Grandes para el Problema de Asignación de Atraques en puertos graneleros

Alan Dávila de León<sup>1</sup>, Eduardo Lalla-Ruiz<sup>2</sup>, Belén Melián-Batista<sup>1</sup>, and J. Marcos Moreno-Vega<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Informática y de Sistemas  
Universidad de La Laguna  
38271 La Laguna, Spain

{alan.davila.de.26, mbmelian, jmmoreno}@ull.es

<sup>2</sup> Institute of Information Systems, University of Hamburg, Germany.  
eduardo.lalla-ruiz@uni-hamburg.de

**Resumen** El creciente volumen en el tráfico marítimo de mercancías a granel se presenta como un desafío para aquellas terminales especializadas que buscan mantener o aumentar su cuota de mercado. En este contexto, la gestión eficiente de las operaciones de atraque es un factor clave a la hora de reducir costes y proporcionar un servicio de alta calidad. En este trabajo, se aborda esta problemática en puertos graneleros a través del Problema de Asignación de Atraques con cargas a granel. Para resolverlo se propone un algoritmo basado en la metaheurística Búsqueda por Entornos Grandes. Los resultados computacionales indican que este procedimiento proporciona resultados de alta calidad en tiempos de cómputo pequeños, inferiores a un segundo.

**Keywords:** Problema de asignación de atraques, Terminal marítima, Metaheurística, Búsqueda por Entornos Grandes

## 1. Introducción

El transporte marítimo es el medio más importante para el comercio a nivel mundial, se estima que el 80% del transporte se realiza por este medio [11]. Según un informe de la Comunidad Europea (CE) publicado en el 2011 [9], el 37.8% del transporte de mercancías en el interior de la CE se realiza a través del mar. Por ello, en este contexto, se buscan sistemas de apoyo a la decisión que permitan maximizar los beneficios a través de la optimización del uso de recursos limitados como son los atraques.

Según Stopford [8], los costes relacionados con el transporte marítimo son clasificados en cinco grandes grupos:

- Costo de operación: están relacionados con aquellas operaciones diarias del barco independientes del dominio de negocio, tripulación, mantenimiento entre otros.

- Costos de mantenimiento: reparaciones importantes realizadas en dique seco.
- Costos de transporte: son dependientes del uso del barco, por ejemplo, las tasas portuarias o consumo de combustible.
- Costos de capital: costes relacionados con la forma en la que se financió la compra o utilización del barco.
- Costos asociados al manejo de la carga: representan aquellos costes relacionados con las operaciones de carga, estiba y descarga de la mercancía.

Desde el punto de vista de las compañías navieras, los únicos costes que pueden ser optimizados, tras la adquisición de un barco, son aquellos relacionados con el transporte y el manejo de la carga. Éstos dependen en gran medida del servicio proporcionado por la terminal portuaria. Un servicio deficiente ocasionaría una sub-utilización del barco ocasionando un incremento de estos costes. En este contexto, Umang *et al.* [10] presenta el Problema de Asignación de Atraques con cargas a granel (Bulk-PAA). Este problema persigue minimizar el tiempo de servicio de los barcos que arriban a la terminal. Para ello, proponen, por una parte, el uso de dos métodos exactos basados en la programación entera y en el problema de división de conjuntos, y por otra parte, una heurística constructiva basada en Squeaky Wheel Optimization (SWO, [6]). Este algoritmo opera en dos espacios, el de prioridades y el de soluciones. Para un orden de prioridad, una heurística construye una solución, el análisis de esa solución conlleva a una modificación del orden de prioridad, que producirá una nueva solución. Este proceso es repetido hasta que se verifique un determinado criterio de parada.

Dado el alto dinamismo presente en las operaciones de atraque así como el impacto de estas operaciones en otras directamente relacionadas como pueden ser la planificación de estiba [1] o rutas de transporte marítimas [3], el Bulk-PAA tiene que ser resuelto frecuentemente. Esto conlleva la necesidad de proporcionar soluciones de alta calidad en tiempos computacionales razonables que permitan replanificar dinámicamente en caso de cambios o modificaciones. Con este objetivo, en este trabajo se propone la aplicación de Búsqueda por Entornos Grandes (BEG) para resolver este problema. Para medir la efectividad de este método se utilizan un conjunto de instancias propuesto en [10] basado en mediciones reales tomadas en el puerto SAQR, Ras Al Khaimah, Emiratos Árabes Unidos.

La organización del artículo se describe a continuación. En primer lugar, la Sección 2 describe el problema de asignación de atraques en puertos graneleros junto con su formulación matemática. En la Sección 3 se presenta la propuesta algorítmica basada en la metaheurística Búsqueda por Entornos Grandes. Los resultados obtenidos se discuten en la Sección 4. Por último, en la Sección 5 se presentan las conclusiones extraídas y se proponen líneas de trabajo futuros.

## 2. Problema de asignación de atraques

El Problema de asignación de atraques (PAA) consiste en asignar posiciones y tiempos de atraque a barcos que arriban a una terminal portuaria con el objetivo de optimizar una función objetivo dada. En la literatura se encuentran diferentes variantes del PAA atendiendo a restricciones espaciales (ver [2], [5]).

En función de las restricciones espaciales, el PAA se puede abordar en su variante discreta, continua o híbrida. El PAA discreto considera que el muelle está dividido en secciones denominadas atraques, donde cada atraque sólo puede atender a un barco a la vez. En el PAA continuo, el muelle no se encuentra dividido, permitiendo a los barcos atracar en cualquier posición del muelle siempre y cuando haya solapamiento. Por último, las características del PAA híbrido son similares a las del caso discreto aunque en este caso, se permite que los barcos ocupen más de una sección, y que las secciones de atraque puedan ser compartidas.

### 2.1. Problema de Asignación de Atraques con cargas a granel

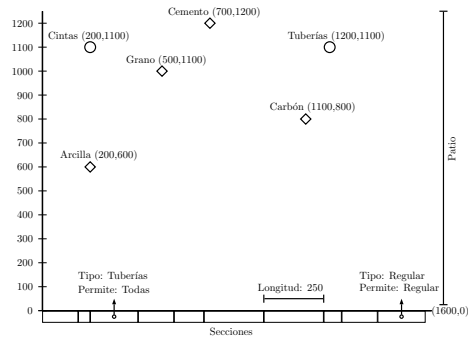
El Problema de Asignación de Atraques con cargas a granel (Bulk-PAA) es propuesto por Umang *et al.* [10] como una extensión del PAA incluyendo cargas a granel y modelando el muelle de forma híbrida. A continuación se detalla la notación utilizada a partir de esta sección.

Notación	Descripción
$N$	Conjunto de barcos
$M$	Conjunto de secciones
$A_i$	Instante de llegada del barco $i \in N$
$m_i$	Instante en el que se empieza a atender al barco $i \in N$
$D_i$	Calado del barco $i \in N$
$L_i$	Longitud del barco $i \in N$
$Q_i$	Cantidad de carga del barco $i \in N$
$W_i$	Tipo de carga que transporta el barco $i \in N$
$d_k$	Calado de la sección $k \in M$
$l_k$	Longitud de la sección $k \in M$
$b_k$	Coordenada de inicio $x$ para la sección $k \in M$
$L$	Longitud total del muelle
$h_k^w$	Tiempo necesario para tratar una unidad de carga de tipo $w$ en la sección $k \in M$
$\alpha_k^w$	Tiempo necesario para transportar una unidad de carga entre el barco con carga de tipo $w$ y la sección $k \in M$
$\beta_k^w$	Tiempo necesario para transportar una unidad de carga entre la localización del depósito en el muelle y la sección $k \in M$
$T$	Constante igual a 100
$n_k^w$	Número de grúas en la sección $k \in M$ para atender la carga de tipo $w$
$v^w$	Ratio de transferencia de la carga de tipo $w$
$\delta_k^w$	Distancia entre la sección $k \in M$ y la localización del depósito para la carga $w$
$c_i^k$	Tiempo necesario para atender al barco $i \in N$ en la sección $k \in M$
$c_i$	Tiempo total empleado para atender al barco $i \in N$
$l_{ik}$	Longitud que ocupa el barco $i \in N$ en la sección $k \in M$ si se coloca en la sección $l$
$p_{ilk}$	Porcentaje que ocupa el barco $i \in N$ de la sección $k$ si se coloca en la sección $l$
$d_{ilk}$	1 si el barco $i \in N$ empezando en la sección $l$ ocupa la sección $k \in M$
$s_k^i$	1 si el barco $i \in N$ empieza en la sección $k \in M$ , 0 en otro caso
$x_{ik}$	1 si el barco $i \in N$ ocupa la sección $k \in M$ , 0 en otro caso
$y_{ij}$	1 si el barco $i \in N$ está atracada a la izquierda del barco $j \in M$ sin solapamiento en espacio, 0 en otro caso
$z_{ij}$	1 si el tiempo de servicio del barco $i \in N$ finaliza antes del inicio del servicio del barco $j \in M$ , 0 en otro caso

## 2.2. Descripción del problema

En el Bulk-PAA se considera una terminal portuaria granelera compuesta principalmente por dos áreas, el muelle y el patio. El patio puede contener más de un tipo de cargas a granel, estos tipos de carga están distribuidos en depósitos localizados a lo largo de un sistema de coordenadas. Por otra parte, cada una de las secciones del muelle tiene una serie de características como el tipo de carga que puede tratar, su longitud o el número de grúas disponibles. Es importante destacar que cada sección tiene asociado un tipo de carga ya que existen restricciones asociadas a las mismas. En el caso de que un barco transporte una carga que deba ser extraída mediante tuberías o cintas transportadoras, únicamente podrá atracar en aquellas secciones que dispongan explícitamente de estos mecanismos. Sin embargo, un barco que transporta una carga regular, por ejemplo grano, puede atracar en cualquier tipo de sección. La Figura 1 ilustra un ejemplo de un escenario para el Bulk-PAA. En este caso, el muelle tiene una longitud total de 1600 metros y se encuentra dividido en 10 secciones. A lo largo del patio se encuentran distribuidos 6 tipos distintos de almacenes para la carga. El muelle, como se aprecia en la figura, se define en un sistema de coordenadas unidimensional, desde el origen (0) hasta la longitud total del muelle (1600).

Figura 1: Representación un escenario para el Bulk-PAA



En el Bulk-PAA, el conjunto de barcos es heterogéneo, esto es, de acuerdo a su carga pueden ser de grano, crudo, etc. Además, cada barco cuenta con una determinada ventana de tiempo, longitud, calado, y volumen de carga. Dado que cada barco tiene asociado un instante de llegada al puerto, este no puede ser atracado antes del mismo. Asimismo, al atracar un barco, éste puede ocupar más

de una sección, pero una sección no puede estar ocupada por más de un barco en el mismo instante de tiempo. Cada barco puede transportar únicamente un tipo de carga y, dependiendo de esta, puede necesitar cintas transportadoras, tuberías o grúas para su descarga.

Para resolver este problema, Umang *et al.* [10] propone el siguiente modelo matemático.

$$\min \sum_i (m_i - A_i + c_i) \quad (1)$$

sujeto a:

$$m_i - A_i \geq 0 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{k \in M} (s_k^i b_k) + B(1 - y_{ij}) \geq \sum_{k \in M} (s_k^i b_k) + L_i \quad \forall i, j \in N, i \neq j \quad (3)$$

$$m_j + B(1 - z_{ij}) \geq m_i + c_i \quad \forall i \in N, \forall j \in N, i \neq j \quad (4)$$

$$y_{ij} + y_{ji} + z_{ij} + z_{ji} \geq 1 \quad \forall i \in N, \forall j \in N, i \neq j \quad (5)$$

$$\sum_{k \in M} s_k^i = 1 \quad \forall i \in N \quad (6)$$

$$\sum_{k \in M} (s_k^i b_k) + L_i \leq L \quad \forall i \in N \quad (7)$$

$$\sum_{l \in M} (d_{ilk} s_l^i) = x_{ilk} \quad \forall i \in N, \forall k \in M \quad (8)$$

$$(d_k - D_i)x_{ilk} \geq 0 \quad \forall i \in N, \forall k \in M \quad (9)$$

$$c_i \geq h_k^w p_{ilk} Q_i s_l^i \quad \forall i \in N, \forall k \in M, \forall l \in M \quad (10)$$

$$s_k^i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, \forall k \in M \quad (11)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, \forall k \in M \quad (12)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N \quad (13)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N \quad (14)$$

La función objetivo (1) busca minimizar el tiempo total de servicio a los barcos. El conjunto de restricciones (2) asegura que los barcos sólo pueden ser atendidos después de llegar al muelle. Nótese que se linealizan las restricciones (3) y (4) por medio de la constante  $B$ , donde  $B$  es un entero positivo suficientemente grande. Las restricciones (5) se encargan de controlar que no haya solapamientos tanto en espacio como en tiempo entre los barcos. El conjunto de restricciones (6) establece que cada barco puede tener únicamente una sección de inicio. El conjunto de restricciones (7) establece que un barco asignado a un muelle tenga longitud suficiente. Las restricciones (9) controlan que el calado de un barco no sea más profundo que el de la sección donde se atraca. Por último, el conjunto de restricciones (10) define el tiempo de servicio de cada barco una vez atracado,  $h_k^w = \alpha_k^w + \beta_k^w = (T/n_k^w) + (v^w \cdot \delta_k^w)$ . Si el barco ocupa más de una sección, el tiempo de servicio del barco será el mayor de las secciones ocupadas.

### 3. Búsquedas por Entornos Grandes para el Bulk-PAA

En este trabajo se propone utilizar la metaheurística Búsqueda por Entornos Grandes (BEG, [7]) conjuntamente con un algoritmo Greedy Randomized Adaptative Search Procedure (GRASP, [4]) encargado de generar la solución de inicio y reconstruir las soluciones a lo largo del proceso de búsqueda de BEG. La metaheurística BEG se caracteriza por permitir acceder a grandes entornos, pero únicamente considerar aquellas partes más prometedoras utilizando una función heurística. BEG define el entorno de una solución a través de dos fases, destrucción y reconstrucción.

- La fase de destrucción consiste en eliminar ciertos elementos de la solución para promover una diversificación del entorno. El número de elementos que se eliminan viene determinado por el llamado grado de destrucción, que debe ser escogido buscando un cierto equilibrio. En caso de ser demasiado pequeño no se explota la capacidad de acceder a grandes entornos. Por el contrario, si es demasiado grande, la fase de reconstrucción parte de una solución casi vacía. Además, el grado de destrucción afecta directamente al método de reconstrucción. Se pueden seguir diversas estrategias para decidir qué elementos son eliminados de la solución, por ejemplo, eliminar elementos aleatorios, evaluar de forma heurística qué elementos se deben eliminar, etc.
- La fase de reconstrucción consiste en volver a introducir en la solución los elementos eliminados anteriormente. Al igual que en la fase anterior, existen diversas estrategias a la hora de reintroducir estos elementos, y se tiene que buscar un equilibrio entre calidad y el tiempo requerido para proporcionar las soluciones.

#### 3.1. Generación y reconstrucción de soluciones usando GRASP

Es una metaheurística constructiva, donde cada iteración se compone de dos fases, una constructiva y una búsqueda local. Estas fases se realizan iterativamente hasta que se cumpla un determinado criterio de parada. En la fase constructiva se parte de una solución incompleta e iterativamente se añaden nuevos elementos a la solución, manteniendo la factibilidad. La elección del nuevo elemento a añadir en cada iteración se hace en base a una evaluación heurística, con el fin de determinar su conveniencia para la solución actual. Tras evaluar los elementos se debe seguir una estrategia para determinar qué nuevo elemento añadir. Esto se lleva a cabo a través de una Lista Restringida de Candidatos (LRC), la cual contiene un subconjunto de los mejores elementos a añadir a la solución. En cada iteración se selecciona de forma estocástica un elemento que se encuentre dentro de la LRC. En este trabajo, el tamaño de la LRC se ha definido como el conjunto de los  $k$  mejores elementos, y se determina en la Sección 4.

Los elementos a introducir son pares barco-sección, cuya evaluación heurística corresponde a la suma entre su tiempo de espera y el tiempo necesario para ser atendido,  $m_i - A_i + c_i^k$ . Cada uno de estos barcos puede ser atendido en diferentes secciones del muelle, por lo que en cada iteración se generan todas las posibles asignaciones para cada par barco-sección.

### 3.2. BEG aplicada al Bulk PAA

A la hora de aplicar BEG al Bulk-PAA, en este trabajo se propone una fase de destrucción aleatoria y una fase de reconstrucción donde se emplea un procedimiento GRASP (ver Sección 3.1). La fase de destrucción consiste en seleccionar de forma aleatoria un subconjunto de barcos que formen parte de la solución y eliminarlos. En la fase de reconstrucción, se emplea el GRASP descrito que proporciona la evaluación heurística y adaptativa (en términos de los elementos ya introducidos) de la solución construida.

En el Algoritmo 1 se muestra el pseudo-código de BEG. El grado de destrucción  $\alpha$  es un parámetro de entrada del problema proporcionado por el usuario. El número de iteraciones se calcula de acuerdo con la siguiente fórmula  $\Gamma = \phi \cdot n$ , donde  $\Gamma$  corresponde al número de iteraciones,  $\phi$  es un parámetro proporcionado por el usuario y  $n$  es el número de barcos.

---

**Algoritmo 1** Búsqueda por Entornos Grandes

---

```
1:  $\Gamma = \phi \cdot n$ 
2:  $i = 1$ 
3: while ( $i \leq \Gamma$ ) do
4:    $s' = \text{destruir}(s, \alpha)$ 
5:    $s' = \text{reconstruir}(s')$ 
6:   if (se acepta  $s'$  como nueva  $s$ ) then
7:      $s = s'$ 
8:   end if
9:    $i = i + 1$ 
10: end while
```

---

## 4. Resultados computacionales

La experiencia computacional presentada en este trabajo se realiza en un equipo con las siguientes características: 4GB de memoria RAM; procesador Intel Core 2 Duo CPU E8500 @ 3.16GHz x 2; Ubuntu 14.04 LTS, 64 bits; lenguaje de programación Java. Para la evaluación de la propuesta algorítmica se escoge un subconjunto de 12 instancias representativas, donde por cada instancia se realizaron un total de 10 pruebas.

Como paso previo a la comparativa incluyendo los mejores algoritmos propuestos en la literatura para el Bulk-PAA, se realiza un ajuste de parámetros para determinar la mejor configuración de GRASP y BEG. En el caso del GRASP se estudia el tamaño de la LRC, entre 1 y 3 candidatos. Mientras que para BEG se ajusta el grado de destrucción y el número máximo de iteraciones. Para el ajuste de parámetros, se realizan todas las combinaciones para los siguientes valores:

- Grado de destrucción:  $\alpha = 0.05 \cdot i, \forall i \in \{1, 2, \dots, 5\}$
- Iteraciones:  $\phi = 10 \cdot i, \forall i \in \{1, 5, 10\}$

En la Tabla 2 se muestran los valores objetivos medios proporcionados por GRASP para distintos tamaños de LRC. Para ello se usó un grupo de reducido de instancias. Tras analizar estos resultados, se detecta que al permitir una cierta diversificación al utilizar más de un elemento en la LRC se obtienen mejores valores objetivos. Sin embargo, en la BEG se decide utilizar una LRC con un único candidato debido a que esta BEG incorpora la diversificación en la fase de destrucción.

Cuadro 2: Análisis del impacto del tamaño de la LRC sobre el valor objetivo de las soluciones

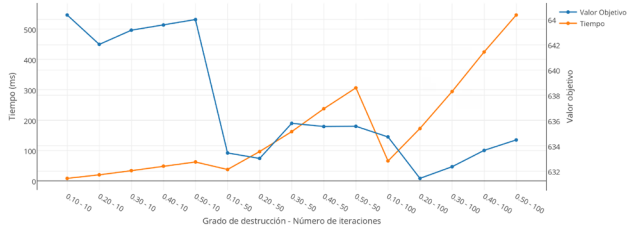
	GRASP		
	$ LRC  = 1$	$ LRC  = 2$	$ LRC  = 3$
A1	254.98	252.88	255.56
A5	256.55	250.38	246.07
B1	194.98	205.75	208.37
B5	193.47	180.86	182.23
C1	981.31	965.83	907.6
C5	826.05	820.07	826.26
D1	827.31	802.27	799.07
D5	606.32	611.08	637.22
E1	1242.88	1182.68	1205.63
E5	1077.59	1102.07	1098.2
F1	998.43	1010.56	1015.41
F5	795.14	799.52	842.33
Media	687.92	681.96	685.33

En la Figura 2, se analiza el impacto del grado de destrucción en el comportamiento de la BEG. Se detecta que para valores de  $\alpha$  iguales a 0.2 se obtiene un mejor rendimiento. El número de iteraciones  $\phi$  se ha fijado en 100, donde se obtienen soluciones de mayor calidad a costa de un mayor tiempo de ejecución.

La Tabla 3 muestra una comparativa entre los resultados proporcionados por Umang *et al.* [10] y los obtenidos en este trabajo. Para cada una de las técnicas se proporciona el valor objetivo obtenido (Obj) y el tiempo de ejecución (Tiempo) medido en segundos. Para el modelo matemático, MILP, se proporciona el error relativo (Gap (%)). Nótese que la marca “-” en la columna correspondiente al tiempo indica que CPLEX alcanzó el límite de tiempo prefijado a 7200 segundos. Asimismo, en la columna GSPP se proporciona el valor objetivo y tiempo de la formulación GSPP implementada en CPLEX. Para la heurística SWO se proporciona el error relativo respecto al valor objetivo proporcionado en la columna GSPP. Por último, para BEG se muestran los valores objetivo mínimos (Min), medios (Media) y máximos (Max). Como se puede apreciar, en todas las instancias se obtienen tiempos inferiores a las demás propuestas. Con respecto a la calidad de las soluciones en términos de valor objetivo, BEG se comporta mejor que el resto de las demás propuestas algorítmicas para las instancias de tamaño medio y grande. Sin embargo, para las instancias pequeñas es ligeramente peor.



Figura 2: Análisis del impacto de los parámetros en BEG para el Bulk-PAA



Cuadro 3: Comparativa de los propuestas algorítmicas para el Bulk-PAA

	MLP			GSP		SWO			BEG				
	Obj	Gap (%)	Tiempo	Obj	Tiempo	Obj	Gap (%)	Tiempo	Min	Media	Max	Tiempo	
10x10													
A1	230,21	0,01	67,67	231,21	5,94	230,48	-0,32	15,81	231,45	232,40	235,34	0,00	
A5	234,20	0,01	5,60	234,22	5,43	234,47	0,11	16,30	241,60	241,60	241,60	0,00	
Media	232,21	0,01	36,64	232,72	5,69	232,48	-0,11	16,06	236,53	237,00	238,47	0,00	
10 x 30													
B1	188,39	0,01	15,80	189,73	94,55	192,81	1,62	49,95	192,83	192,83	192,83	0,01	
B5	178,48	0,01	10,97	179,23	85,01	179,01	-0,12	48,37	179,43	179,53	179,80	0,01	
Media	183,44	0,01	13,39	184,48	89,78	185,91	0,75	49,16	186,13	186,18	186,32	0,01	
25 x 10													
C1	812,32	33,08	-	819,22	14,09	869,31	6,11	22,29	811,02	833,65	862,14	0,03	
C5	751,19	27,47	-	747,88	10,41	774,17	3,51	22,16	739,96	748,17	763,78	0,03	
Media	781,76	30,28	-	783,55	12,25	821,74	4,81	22,23	775,49	790,91	812,96	0,03	
25 x 30													
D1	690,79	23,14	-	670,42	219,04	785,91	17,23	105,36	704,56	715,81	722,56	0,15	
D5	560,65	25,96	-	556,37	172,09	614,72	10,49	91,35	547,50	567,16	579,08	0,10	
Media	625,72	24,55	-	613,40	195,57	700,32	13,86	98,36	626,03	641,49	650,82	0,13	
40 x 10													
E1	1243,64	63,77	-	1140,60	41,73	1289,88	13,09	28,24	1154,32	1180,73	1206,95	0,19	
E5	1105,34	56,98	-	1063,85	19,06	1202,50	13,03	32,06	1072,71	1076,45	1077,59	0,16	
Media	1174,49	60,38	-	1102,23	30,40	1246,19	13,06	30,15	1113,52	1128,59	1142,27	0,17	
40 x 30													
F1	1193,42	70,56	-	920,73	506,02*	1092,44	18,65	169,53	933,06	940,99	951,75	0,76	
F5	881,37	61,20	-	786,27	137,91*	857,47	9,06	163,41	708,70	772,14	775,36	0,63	
Media	1037,40	65,88	-	853,50	321,97	974,96	13,86	166,47	850,88	856,57	863,56	0,69	

## 5. Conclusiones

En este trabajo se ha propuesto una Búsqueda por Entornos Grandes (BEG) para el Problema de Asignación de Atraques con cargas a granel buscando minimizar el tiempo de servicio de los barcos. En el estudio computacional, se ha analizado su rendimiento en términos de tiempos de ejecución y valor objetivo. En este sentido, BEG proporciona soluciones de alta calidad en el orden de segundos, lo cual aconseja su utilización en entornos altamente dinámicos como son las terminales portuarias. Por otro lado, el balance entre calidad y coste computacional justifica el uso de BEG en marcos generales donde Bulk-PAA puede estar integrado y su resolución sea necesaria para proporcionar soluciones globales en el contexto del transporte de cargas a granel.

Como trabajo futuro se plantea la implementación de una fase de aceptación de la solución actual, junto con un cambio sistemático de las estructuras de entorno para mejorar el comportamiento general del procedimiento propuesto.

## Referencias

1. Mordecai Avriel, Michal Penn, and Naomi Shpirer. Container ship stowage problem: complexity and connection to the coloring of circle graphs. *Discrete Applied Mathematics*, 103(1):271–279, 2000.
2. Christian Bierwirth and Frank Meisel. A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. *European Journal of Operational Research*, 202(3):615–627, 2010.
3. Marielle Christiansen, Kjetil Fagerholt, and David Ronen. Ship routing and scheduling: Status and perspectives. *Transportation Science*, 38:1 – 18, 2004.
4. Thomas Feo and Mauricio Resende. Greedy randomized adaptive search procedures. *Journal of Global Optimization*, 6(2):109–133, 1995.
5. Akio Imai, Etsuko Nishimura, and Stratos Papadimitriou. The dynamic berth allocation problem for a container port. *Transportation Research Part B: Methodological*, 35(4):401–407, 2001.
6. David E Joslin and David P Clements. Squeaky wheel optimization. *Journal of Artificial Intelligence Research*, pages 353–373, 1999.
7. Paul Shaw. Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems. In *Principles and Practice of Constraint Programming—CP98*, pages 417–431. Springer, 1998.
8. Martin Stopford. Maritime economics. 2003.
9. UE. Commission staff working document roadmap to a single european transport area – towards a competitive and resource efficient transport system. 2011.
10. Nitish Umang, Michel Bierlaire, and Ilaria Vacca. Exact and heuristic methods to solve the berth allocation problem in bulk ports. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 54(0):14 – 31, 2013.
11. UNCTAD. Review of maritime transport. 2013.