

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/270452262>

# UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN DIFUSO PARA ASIGNACIÓN DE ATRAQUES CON RETRASOS EN LA LLEGADA DE LOS...

Conference Paper · November 2014

DOI: 10.13140/2.1.5057.3124

CITATIONS

0

READS

78

4 authors, including:



[Flabio Alfonso Gutiérrez Segura](#)

Universidad Nacional de Piura

8 PUBLICATIONS 18 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Federico Barber](#)

Universitat Politècnica de València

147 PUBLICATIONS 1,009 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Edmundo Rubén Vergara](#)

National University of Trujillo

8 PUBLICATIONS 26 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**17** del 24 al 28 de noviembre de 2014  
**CONVENCIÓN CIENTÍFICA  
DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
PALACIO DE CONVENCIONES DE LA HABANA



## **UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN DIFUSO PARA ASIGNACIÓN DE ATRAQUES CON RETRASOS EN LA LLEGADA DE LOS BARCOS**

**Flabio Gutiérrez S.<sup>1</sup>, Mario Rodríguez M.<sup>2</sup>, Federico Barber S.<sup>3</sup>, Edmundo Vergara M.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Matemática, Universidad Nacional de Piura – Perú, <sup>2,3</sup> Departamento de Sistemas Informáticos y Computación, Universidad Politécnica de Valencia - España, <sup>4</sup> Departamento de Matemática, Universidad Nacional de Trujillo – Perú.

<sup>1</sup>flabio@unp.edu.pe, <sup>2,3</sup>{mrodriguez, fbarber}@dsic.upv.es, <sup>4</sup>evergara@unitru.edu.pe

### **RESUMEN**

El problema de asignación de atraques (BAP) en un terminal marítimo de contenedores se define como la asignación factible de atraques a los barcos entrantes. En este trabajo, desarrollamos un modelo de programación matemática difusa para el BAP continuo y dinámico. Se asume que el tiempo de llegada de los barcos es impreciso, en el sentido que los barcos pueden retrasarse hasta una tolerancia permitida. Se utilizan conjuntos difusos para representar la imprecisión. El modelo propuesto ha sido codificado en CPLEX y evaluado en diferentes instancias. Los resultados obtenidos muestran que el modelo propuesto puede ayudar a los administradores de un terminal marítimo de contenedores, pues tiene a su disposición planes de atraque con diferente grado de retraso permitido y optimizados respecto al tiempo de espera. Con la característica que, a más posibilidad de retrasarse de un barco, el modelo le otorga un tiempo de atraque impreciso que soporta más retraso.

**PALABRAS CLAVES:** Problema de asignación de atraques difusos, programación lineal difusa, imprecisión

### **A FUZZY OPTIMIZATION MODEL FOR BERTH ALLOCATION PROBLEM TO VESSELS ARRIVING WITH DELAY**

#### **ABSTRACT**

The berth allocation problem (BAP) in a maritime container terminal is defined as a feasible allocation of berths to incoming vessels. In this paper, we developed a fuzzy mathematical programming model for continuous and dynamic BAP. It is assumed that the arriving time of vessels is imprecise, in the sense that the vessels can have a delay but only up to a permitted tolerance. Fuzzy sets are used to represent the imprecision. The proposed model has been codified in CPLEX solver and evaluated in different instances. The obtained results shows that the proposed model can help the container terminal managers, since it has available berth plans with different degrees of allowed delay, which are optimized according to the waiting time. One of the model's features is that, as a vessel has more possibilities to be late, the model grants her a fuzzy berth time that supports that delay.

**KEY WORDS:** Fuzzy berth allocation problem, fuzzy linear programming, imprecision

### **1. INTRODUCCIÓN**

Aproximadamente el 80% del mercado global se lleva a cabo a través del mar [1] y es mayormente transferido en contenedores. Los contenedores son cajas grandes de metal hechas en medidas estándar y se miden en múltiplos de 20 pies llamado “twenty-foot equivalent units” (TEU). El volumen del comercio en contenedores en el 2012 llegó a 155 millones de TEUs [2]. Los terminales portuarios que manejan contenedores son llamados terminales marítimos de contenedores (TMC), estos tienen diferentes



**17** del 24 al 28 de noviembre de 2014  
**CONVENCIÓN CIENTÍFICA  
DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
PALACIO DE CONVENCIONES DE LA HABANA



y más complejas operaciones que los puertos de pasajeros o los puertos de carga y descarga a granel. Un TMC, generalmente sirve como zona de transbordo entre barcos y vehículos terrestres (trenes o camiones).



Figura 1: Terminal marítimo de contenedores en el puerto de Valencia

Los TMC, son sistemas abiertos con tres áreas diferenciadas (ver Figura 1): el área de atraque (The berth area), donde los barcos son atracados para el servicio (cargar o descargar contenedores); el patio de almacenamiento de contenedores (The storage yard), donde los contenedores se almacenan temporalmente mientras esperan a ser exportados o importados; y el área de recepción y entrega (The gate area), que conecta el terminal de contenedores con el sistema de transporte al interior de un país (abastecimiento para la exportación o distribución en caso de importación). Cada uno de ellos presenta diferentes problemas de planificación y scheduling para ser optimizados [3], por ejemplo, la asignación de muelle, planificación de la estiba, scheduling de las grúas del muelle deben ser gestionados en el área de atraque; el problema de apilamiento de contenedores, las operaciones de transporte horizontal deben llevarse a cabo en el patio de contenedores. En este trabajo se abordará el problema de asignación de atraques, también conocido como BAP (Berth Allocation Problem), un problema NP-duro de optimización combinatoria [4], que consiste en asignar a cada barco entrante una posición de atraque en el muelle. Una vez que el barco llega al puerto, entra en tiempo de espera para atracar en el muelle. Los administradores de los TMC se enfrentan a dos decisiones relacionadas: *dónde* y *cómo* los barcos deben atracar. Los tiempos reales de la llegada de los barcos son bastante inciertos, esta incertidumbre depende por ejemplo, de las condiciones meteorológicas (vientos, tormentas), problemas técnicos, otros terminales que el barco tiene que visitar o por otras razones. Sólo la mitad de los barcos llega a tiempo [5]. Esto tiene efectos en las operaciones de carga y descarga, otras actividades del terminal, y por tanto, en los servicios requeridos por el cliente. Los administradores de los TMC cambian o revisan los planes, pero una revisión frecuente del plan de atraque no es deseable desde el punto de vista de la planificación de recursos [6]. Por lo tanto, la capacidad de adaptación del plan de atraque es importante para la buena performance del sistema que maneja un TMC. Como resultado, el posible retraso en la llegada de los barcos, debe considerarse al hacer un plan de atraque.

Hay varios tipos de incertidumbre, como la aleatoriedad, imprecisión (ambigüedad, vaguedad), la confusión.



**17** del 24 al 28 de noviembre de 2014  
**CONVENCIÓN CIENTÍFICA  
DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
PALACIO DE CONVENCIONES DE LA HABANA



Varios tipos de incertidumbre puede ser categorizados como estocásticos o difusos [7]. Los conjuntos difusos están especialmente concebidos para hacer frente a la imprecisión.

En este trabajo asumimos un modelo difuso para el BAP continuo y dinámico. Asumimos que el tiempo de llegada de los barcos es impreciso, en el sentido que los barcos pueden retrasarse hasta una tolerancia permitida. Esto puede ayudar a los tomadores de decisiones, pues el modelo permite obtener planes de atraque con diferente grado de retraso permitido y optimizados respecto al tiempo de espera.

El artículo se estructura de la siguiente forma. En la Sección 2, se presenta una revisión de la literatura relacionada con el BAP bajo imprecisión. Posteriormente, en la Sección 3, se describe los conceptos básicos de optimización con recursos difusos. En la Sección 4, se propone el modelo de programación lineal difuso para el problema de asignación de atraques con retrasos en la llegada de los barcos. Seguidamente, en la Sección 5, se evalúan los resultados obtenidos con el modelo. Por último, se presentan las conclusiones y las líneas futuras de investigación.

## **2. REVISIÓN DE LA LITERATURA**

Hay varios atributos para clasificar los modelos relacionados con el BAP [8], los más importantes son: el espacial y el temporal. El atributo espacial puede ser discreto o continuo. Para el caso discreto, el muelle es visto como un conjunto finito de atraques, donde cada atraque se describe por segmentos de longitud fija, usualmente, un atraque solo sirve a un barco a la vez; para el caso continuo, los barcos pueden atracar en posiciones arbitrarias dentro de los límites del muelle. El atributo temporal puede ser estático o dinámico. Para el caso estático, se asume que todos los barcos están en el puerto antes de realizar el plan de atraque; en el caso dinámico, los barcos pueden llegar al puerto en diferentes tiempos, durante el horizonte de planificación. Los barcos no pueden atracar antes de su hora prevista de llegada.

En ([8], [9]), los autores hacen una exhaustiva revisión de la literatura existente sobre el BAP. Hasta donde conocemos, en la literatura hay muy pocos estudios que traten el BAP con datos imprecisos.

Un trabajo que trató con entornos deterministas y difusos para la distribución de contenedores fue presentado en [10]. Los autores desarrollaron un modelo de programación binaria con parámetros difusos. Las distancias entre el muelle y la zona de terminales, el número de contenedores en un barco que ha llegado y la estimación del área disponible en cada terminal en un puerto, fueron asumidos en una condición imprecisa. La imprecisión se representó con números difusos trapezoidales. El objetivo es minimizar la distancia total recorrida por los contenedores desde el barco, hasta a la zona de terminales que les fueron asignados. El problema de asignación de atraques es tratado como un BAP discreto y estático y no consideran imprecisión en la llegada de los barcos.

Un modelo planteado como problema lineal entero mixto (MILP) difuso para el BAP discreto y dinámico fue propuesto en [11]. Los tiempos de llegada de los barcos están representados por números difusos triangulares. Se presenta el modelo y el diseño de un método de solución basada en MILP paramétrica, aunque no se muestra su evaluación. Pero, no tratan el BAP continuo, según Bierwirth [8], para el diseño de un modelo continuo, la planificación del atraque es más complicada que para un diseño discreto, pero se tiene la ventaja de una mejor utilización del espacio del muelle.

En este trabajo proponemos un modelo de optimización difusa para el BAP continuo y dinámico. Suponemos que los barcos pueden retrasarse un cierto tiempo tolerable o permitido. Esta tolerancia se representa con un conjunto difuso con función de pertenencia de tipo triangular.

## **3. OPTIMIZACIÓN DIFUSA**

Los conjuntos difusos ofrecen un entorno flexible para optimizar sistemas complejos. A continuación, se presenta algunos conceptos necesarios en el planteamiento.





**17** del 24 al 28 de noviembre de 2014  
**CONVENCIÓN CIENTÍFICA**  
**DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
 PALACIO DE CONVENCIONES DE LA HABANA



## Conjuntos difusos

Sea  $X$  el universo del discurso, un conjunto difuso  $\tilde{A}$  en  $X$  es un conjunto de pares:

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)), x \in X\}$$

Donde  $\mu_{\tilde{A}}: X \rightarrow [0,1]$  es llamada *función de pertenencia*,  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  representa el grado en que  $x$  pertenece al conjunto  $\tilde{A}$ .

Para nuestros propósitos, nos restringimos a conjuntos difusos en la recta real  $R$ . Una función de pertenencia puede ser triangular, trapezoidal, sigmoideal, etc.

## Programación lineal con recursos difusos

Un problema de Programación Lineal (PL) es aquel que optimiza.

$$\begin{aligned} z &= cx \\ Ax &\leq b \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

Los problemas de PL generan programas donde los parámetros  $c$  (utilidades o costos),  $b$  (disponibilidad de recursos) y  $A$  (la matriz de los coeficientes tecnológicos) son números conocidos con precisión. Pero en los problemas reales, cuando se tienen problemas de planificación, algunos de los parámetros indicados no son conocidos con precisión, sino de una manera imprecisa.

En este trabajo se abordan aquellas situaciones de PL, donde, la disponibilidad de los recursos es imprecisa y como consecuencia la meta también es imprecisa [12]. Para cada recurso  $i$  considere una cantidad deseable  $b_i$ , pero se acepta que sea mayor hasta un tope máximo  $b_i + t_i$  ( $t_i$  es denominado nivel de tolerancia).

Un modelo general de PL con recursos difusos se formula de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \max z &= cx \\ \text{Sujeto a:} \quad (Ax)_i &\leq \tilde{b}_i \quad i = 1, 2, \dots, m \\ x &\geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Donde  $c \in R^n$ ,  $A$  es una matriz  $m \times n$  y  $b \in R^m$ , el símbolo  $\tilde{b}_i$  indica los recursos difusos y se asume la existencia de  $m$  funciones de pertenencia  $\mu_i: R^m \rightarrow [0,1]$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ .

Para resolver (1), se han propuesto diferentes métodos (Chanas [13], Tanaka et al [14], Verdegay [15], Werners [16]). En este trabajo se utiliza el método de Verdegay.

Supongamos que en el modelo (1), las funciones de pertenencia de  $\tilde{b}_i$  son lineales (Ver Figura 2), con ecuación:

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 1 & ; (Ax)_i < b_i \\ 1 - \frac{[(Ax)_i - b_i]}{t_i} & ; b_i \leq (Ax)_i \leq b_i + t_i \\ 0 & ; (Ax)_i > b_i + t_i \end{cases} \quad (2)$$

Lo ideal es hallar la solución óptima para  $(\mu_i(x) = 1)$ ,  $i = 1, \dots, m$ ; sin embargo, sería aceptable obtener una solución óptima para algún valor  $\mu_i(x)$  mayor que un  $\alpha_i$  entendida como un nivel de satisfacción



mínima fijada a priori, de acuerdo con la naturaleza del problema, y lo que es fundamental, en interacción con el tomador de decisiones

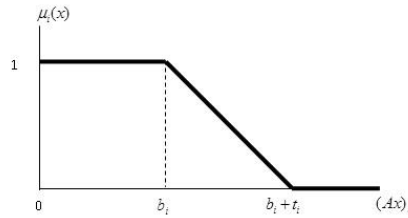


Figura 2: Función de pertenencia seccionalmente lineal.

Según Verdegay [15], para la ecuación lineal (2), el problema (1) se transforma en el problema paramétrico siguiente:

$$\begin{aligned} \max z &= cx \\ \text{Sujeto a:} \quad & (Ax)_i \leq b_i + (1 - \alpha) t_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & x \geq 0, \alpha \in [0, 1] \end{aligned} \quad (3)$$

Si  $x(\alpha)$  es la solución paramétrica óptima de (3), la solución difusa para (1) estaría dada por el conjunto difuso denotado por  $\{\alpha, x(\alpha)\}$ .

#### 4. MODELO BAP DIFUSO CON RETRASO EN LA LLEGADA DE LOS BARCOS

En esta sección, mostramos un modelo difuso para el BAP continuo y dinámico. Se presenta la notación de los principales parámetros que se utilizarán en el modelo (Figura 3).

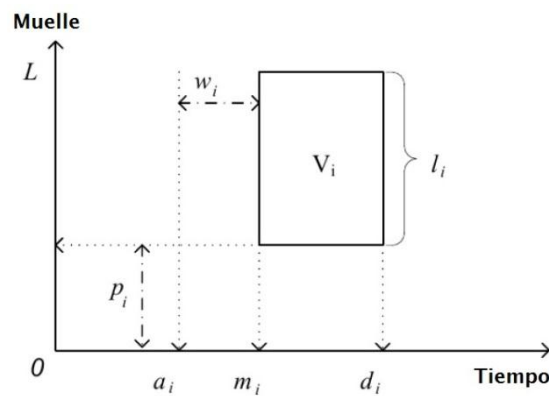


Figura 3: Representación de un barco de acuerdo a su posición y tiempo.

$L$ : longitud total del muelle del TMC;  $H$ : horizonte de planificación.

Sea  $V$ , el conjunto de barcos entrantes, los datos del problema para cada barco  $i \in V$ , están dados por:  $a_i$ : tiempo de llegada al puerto;  $w_i = m_i - a_i$ , tiempo de espera del barco desde que llega hasta que atracará;  $l_i$ : longitud del barco;  $h_i$ : tiempo de estancia del barco en el lugar de atraque (tiempo de servicio).



Con estos datos, se deben decidir las variables:  $m_i$ : Tiempo de atraque del barco;  $p_i$ : posición donde será atracado el barco. El tiempo de partida del barco  $d_i$  dependerá de  $m_i$  y  $h_i$ . La posición de atraque  $p_i$  se determinará de acuerdo con la longitud de los barcos.

Tenemos en cuenta las siguientes suposiciones: Toda la información relativa a los barcos en espera se conoce de antemano, cada barco tiene un calado menor o igual que el muelle, el momento del atraque y desatraque no consume tiempo, está permitido el atraque simultáneo, no se considera distancia de seguridad entre los barcos.

El objetivo es distribuir todos los barcos de acuerdo a unas restricciones, minimizando el tiempo de espera total de los barcos.

$$Tw = \sum_{i \in V} (m_i - a_i)$$

Con el fin de asignar un barco en el muelle, deben cumplirse las restricciones: El tiempo de atraque debe ser al menos el mismo que el tiempo de llegada:  $m_i \geq a_i$ . Hay suficiente espacio contiguo en el muelle para atracar la embarcación:  $p_i + l_i \leq L$ .

En este trabajo, se asume que el tiempo de llegada de los barcos es impreciso, en el sentido que los barcos pueden retrasarse hasta una cierta tolerancia permitida.

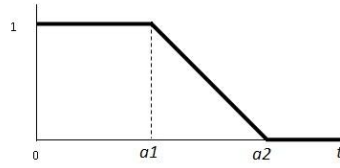


Figura 4: Llegada imprecisa (difusa) de un barco entre  $a1$  y  $a2$

La llegada de cada barco se representa mediante un conjunto difuso, con una función de pertenencia que se observa en la Figura 4, es decir, se considera que la llegada con más posibilidad de un barco será en el tiempo  $a1$ , pero se permite que se retrase hasta un tiempo máximo  $a2$ . Con la posibilidad de retrasos en las llegadas y en base al modelo determinista [17], proponemos un modelo difuso para manejar la imprecisión.

$$\min \sum_{i \in V} (m_i - a1_i) \quad (4)$$

Sujeto a:

$$m_i \geq a1_i \quad \forall i \in V \quad (5)$$

$$p_i + l_i \leq L \quad \forall i \in V \quad (6)$$

$$p_i + l_i \leq p_j + M(1 - z_{ij}^x) \quad \forall i, j \in V, i \neq j \quad (7)$$

$$m_i + h_i \leq H \quad \forall i \in V \quad (8)$$

$$m_j - (m_i + h_i) + M(1 - z_{ij}^y) \geq \tilde{r}_i \quad \forall i, j \in V, i \neq j \quad (9)$$

$$z_{ij}^x + z_{ji}^x + z_{ij}^y + z_{ji}^y \geq 1 \quad \forall i, j \in V, i \neq j \quad (10)$$

$$z_{ij}^x, z_{ij}^y \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V, i \neq j \quad (11)$$

Donde  $z_{ij}^x$  es una variable binaria que indica si el barco  $i$  está localizado a la izquierda del barco  $j$  en el atraque ( $z_{ij}^x = 1$ ),  $z_{ij}^y = 1$  indica que el tiempo de atraque del barco  $i$  está antes que el del barco  $j$ .  $M$  es una constante entera grande. La restricción (9), obliga que para un barco  $j$  que atraca después del barco  $i$ , su tiempo de atraque  $m_j$  incluya el retraso  $\tilde{r}_i$  que se le puede tolerar al barco  $i$ .



### Aplicación al modelo BAP difuso

Supongamos que para cada barco  $i$ ,  $a1_i$  representa el tiempo de llegada con más posibilidad del barco y  $a2_i$  es el máximo tiempo de llegada permitido (Ver Figura 4).

De acuerdo al método de Verdegay (Ver Apartado 3), una solución al modelo BAP difuso, se obtiene del siguiente modelo paramétrico MILP.

---

#### Algoritmo 1: Asignación de atraques con retraso en la llegada de los barcos

---

**Entrada** :  $V$ : Conjunto de barcos entrantes

**Resultados**: Planes de atraque con retrasos para  $V$ ;

1 **foreach**  $\theta = \{0, 0.1, \dots, 1\}$  **do**

    /\* Se calcula los retrasos

\*/

2      $r_i(\theta) = \theta * (a2_i - a1_i) \quad \forall i \in V$

3

$$\min \sum_{i \in V} (m_i - a1_i)$$

Sujeto a:

$$m_i \geq a1_i \quad \forall i \in V$$

$$p_i + l_i \leq L \quad \forall i \in V$$

$$p_i + l_i \leq p_j + M(1 - z_{ij}^x) \quad \forall i, j \in V, i \neq j$$

$$m_j - (m_i + h_i) + M(1 - z_{ij}^y) \geq r_i(\theta) \quad \forall i, j \in V, i \neq j$$

$$z_{ij}^x + z_{ji}^x + z_{ij}^y + z_{ji}^y \geq 1 \quad \forall i, j \in V, i \neq j$$

$$z_{ij}^x, z_{ij}^y \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V, i \neq j$$

---

El horizonte de planificación esta dado por  $H = \sum_{i \in V} (h_i) + \max\{a2_i, i \in V\}$

En el Algoritmo 1, el valor de  $\theta$  es el grado o porcentaje de retraso permitido en el tiempo de llegada de los barcos. Para cada  $\theta \in [0, 1]$ , y para cada barco  $i$ , se calculan los retrasos permitidos  $r(\theta) = \theta * (a2_i - a1_i)$ . La solución del modelo proporciona planes de atraque que soporten un grado de retraso indicado por el tomador de decisiones. Cuanto mayor sea el valor  $\theta$ , mayor será el tamaño de los retrasos. Por lo tanto, el plan de atraque incrementa su capacidad para soportar retrasos más grandes, pero, la función objetivo que minimiza el tiempo de espera respecto a las llegadas precisas, se incrementa.

## 5. EVALUACIÓN

Los experimentos fueron realizados en 50 instancias, estas, consisten de 8 barcos con una distribución uniforme en los tiempos de llegada con retrasos. Todas las instancias tienen las mismas características (tiempo de servicio y longitud), así como el tiempo de llegada con más posibilidad  $a1$ . Pero, todas las instancias tienen diferentes valores para el máximo tiempo de llegada permitido  $a2$ . La longitud del muelle es  $L=700$ . El algoritmo ha sido codificado y resuelto en forma optima en CPLEX. Las instancias fueron resueltas en una computadora personal equipada con un Core 2 Quad Q9505 2.83Ghz con 4.00 Gb RAM. Los experimentos se llevaron a cabo con un "timeout" (tiempo de cómputo máximo) de 60 minutos.





Los nuevos parámetros para los barcos, que se utilizarán en esta sección son:  $m1$  : tiempo de atraque óptimo;  $m2$  : tiempo de atraque máximo permitido;  $r$  : tiempo de retraso máximo permitido a los barcos. Una instancia se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Ejemplo de una instancia de los barcos.

Barcos	a1	a2	h	l
V1	8	34	121	159
V2	15	36	231	150
V3	32	50	87	95
V4	40	46	248	63
V5	52	72	213	219
V6	68	86	496	274
V7	75	90	435	265
V8	86	87	146	94

Por ejemplo, el barco V1 debe llegar a las 8 unidades de tiempo, pero se le permite retrasarse hasta las 34 unidades de tiempo.

El valor de  $\theta$  representa el grado de retraso permitido a los barcos. Por ejemplo,  $\theta=0$  significa 0% de retraso permitido,  $\theta=0.6$  es el 60 % de retraso permitido.

Para cada una de las instancias y para cada uno de los barcos, considerando once grados de retrasos ( $\theta = \{0, 0.1, \dots, 1\}$ ), se generaron 11 planes de atraque.

Tabla 2: Tres planes de atraque con retrasos para la instancia de la Tabla 1.

V	$\theta = 0.0$				$\theta = 0.5$				$\theta = 1$			
	m1	r	m2	d	m1	r	m2	d	m1	r	m2	d
V1	8	0	8	129	8	13	21	142	8	26	34	155
V2	15	0	15	246	15	10.5	25.5	256.5	15	21	36	267
V3	32	0	32	119	32	9	41	128	32	18	50	137
V4	40	0	40	288	40	3	43	291	40	6	46	294
V5	52	0	52	265	52	10	62	275	52	20	72	285
V6	265	0	265	761	256.5	9	265.5	761.5	267	18	285	781
V7	246	0	246	681	275	7.5	282.5	717.5	285	15	300	735
V8	119	0	119	265	128	0.5	128.5	274.5	137	1	138	284

Como un ejemplo ilustrativo, para la instancia de la Tabla 1, tres planes de atraque diferentes se muestran en la Tabla 2 y en forma gráfica en la Figura 5. Estos planes fueron obtenidos con el Algoritmo 1, variando el valor de  $\theta$  ( $\theta = \{0, 0.5, 1.0\}$ ).

Para  $\theta=0$ , en todos los barcos los retrasos son  $r=0$  (no se permite retrasos en los barcos). En la mayoría de los casos, si un barco se atrasa en llegar respecto a su tiempo preciso de llegada este plan deja de ser válido. Por ejemplo, el barco V3 tiene un tiempo de atraque  $m1=32$  y tiempo de salida  $d=119$ , si este barco se atrasa el barco V8 no puede atracar en su tiempo asignado  $m1 = 119$ , y el que le sigue, el barco V6 tampoco puede atracar en su tiempo asignado  $m1 = 265$ , esto se puede observar mejor en la Figura 5. Para un número mayor de barcos (como es en la realidad), el retraso de los barcos complica aún más los planes de atraque.

En  $\theta=0.5$  (un retraso permitido del 50%), por ejemplo, para el barco V3, el tiempo de atraque óptimo es  $m1=32$ , el retraso permitido es  $r = 9$ , es decir, el barco puede atracar en el intervalo de tiempo  $[32; 41]$ , y



puede salir hasta un tiempo máximo de 128. Después del barco *V3*, el barco *V8* puede atracar en el tiempo  $m1 = 128$  con un retraso permitido de  $r=0.5$  (ver Figura 5).

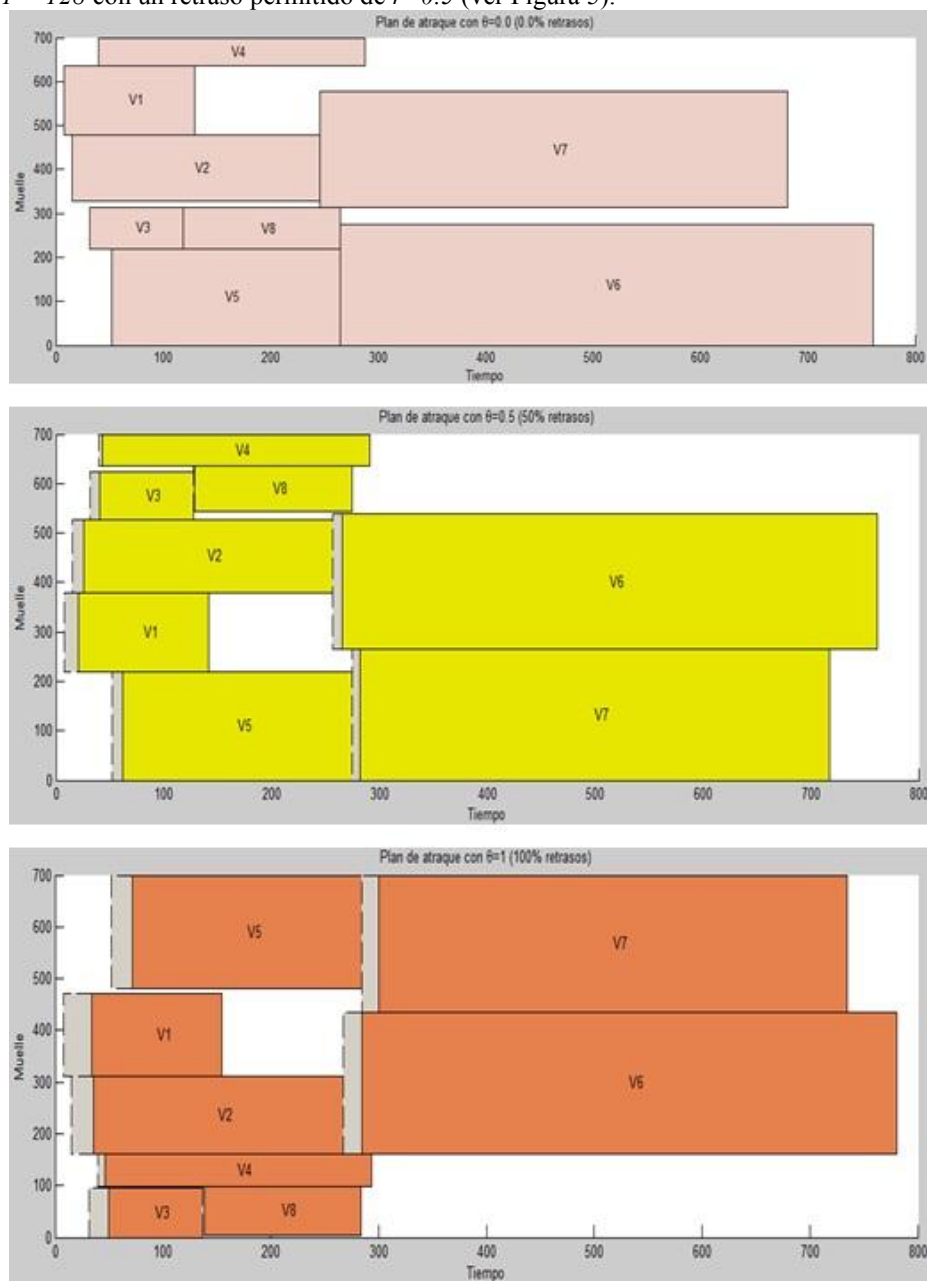


Figura 5: Representación gráfica de los tres planes de atraque de la Tabla 2.

En  $\theta=1$  (un retraso permitido del 100%), los retrasos son incrementados, por ejemplo, para el barco *V3*, el tiempo óptimo de atraque es  $m1=32$  (el mismo que para  $\theta = 0.5$ ), pero el retraso permitido es  $r=18$ . Por lo tanto, el intervalo de tiempo donde el barco puede atracar es  $[32; 50]$  (ver Figura 5).

Por la forma como se ha construido el modelo, para cada valor de  $\theta$ , los retrasos permitidos son proporcionales a su tiempo máximo de retraso. Por ejemplo, el barco *V1* y el barco *V3*, pueden retrasarse



hasta un máximo de 26 y 18 unidades de tiempo respectivamente (ver Tabla 1). Para un grado de retraso permitido de  $\theta=0.5$ , los retrasos para el barco V1 y el barco V3, son  $r=13$  y  $r=9$  respectivamente. Para las cincuenta instancias, la Figura 6 ilustra la variación del promedio del  $T_w$  con respecto al grado de retraso  $\theta$ . Hay una relación lineal entre el grado de retraso y el  $T_w$ , el incremento del grado de retraso, incrementa el  $T_w$ .

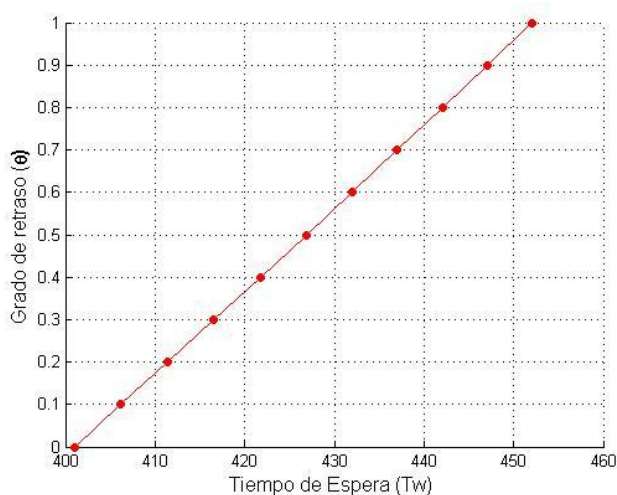


Figura 6: Función objetivo y grado de retraso.

Tabla 3: Tiempo de cómputo y el objetivo obtenido para cada grado de retraso.

$\theta$	$T_w$	Tiempo (s)
0	401	1.01
0.1	406.19	0.79
0.2	411.38	0.84
0.3	416.57	0.86
0.4	421.71	0.91
0.5	426.84	0.85
0.6	431.94	0.92
0.7	437.03	0.89
0.8	442.1	0.88
0.9	447.09	0.85
1	452.04	0.89

El tomador de decisiones del TMC, puede escoger un plan de acuerdo al par  $(\theta, T_w)$  que sea una solución satisfactoria. Por ejemplo, si se desea el plan más óptimo aunque no permita retrasos en la llegada de los barcos, puede escoger el par  $(0, 401)$ ; si se desea un plan que soporte un 50 % de retraso en la llegada de los barcos aunque se pierda optimalidad, tiene la posibilidad de elegir el par  $(0.5, 426.84)$ .

En la Tabla 3, se muestra el promedio del  $T_w$  y el tiempo de cómputo de las 50 instancias para los diferentes grados de retrasos permitidos. El menor  $T_w = 401$  se obtiene con tiempo de 1.01 segundos



correspondiente a un grado de retraso  $\theta = 0$ ; y el mayor  $T_w = 452.04$ , se obtiene en un tiempo de 0.89 segundos correspondiente a un grado de retraso  $\theta = 1$  (ver Figura 7).

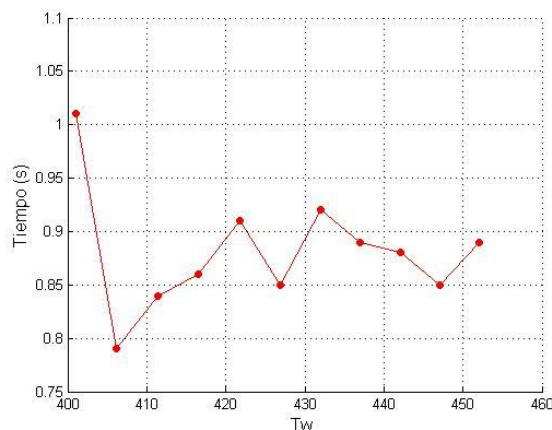


Figura 7: Tiempo total de espera y tiempo de computo

## 6. CONCLUSIONES

El sistema de un TMC requiere herramientas que ayuden a los administradores en la toma de decisiones. El BAP es uno de los problemas más críticos y estudiados en los TMC. Muchas investigaciones se han desarrollado sobre el BAP, sin embargo, la mayoría asume que la llegada de los barcos es determinista. Esto no es real, en la práctica pueden ocurrir retrasos en las llegadas de los barcos. Por lo tanto, la adaptabilidad de un plan de atraque es importante para el rendimiento global del sistema en un TMC.

En este trabajo, se ha presentado un modelo MILP difuso para el BAP continuo y dinámico. En el modelo propuesto, se asumió que el tiempo de llegada de los barcos es impreciso, en el sentido que los barcos pueden retrasarse hasta un grado de tolerancia permitido. Esta imprecisión se representó mediante conjuntos difusos con función de pertenencia de forma triangular.

El modelo propuesto fue codificado y resuelto en forma óptima con la herramienta de optimización CPLEX. El modelo ha sido evaluado por medio de 50 instancias de ocho barcos. Se utilizó ocho barcos con fines ilustrativos, pero el modelo se comporta de la misma manera para un número mayor de barcos.

Los resultados obtenidos mostraron que el procedimiento puede ayudar a los administradores de un TMC en la toma de decisiones, pues tiene a su disposición planes de atraque con diferentes grados de retraso permitidos y optimizados respecto al tiempo de espera, con la característica que, a más posibilidad de retrasarse de un barco, el modelo le otorga un tiempo de atraque impreciso que soporta más retraso.

Finalmente, como resultado de la investigación, se abren posibilidades para futuras investigaciones: (i) Modelos de optimización difusa que contemplen la posibilidad que los barcos puedan llegar antes o después de la hora señalada. (ii) Extender el modelo propuesto, para tratar con problemas de optimización que contemplen la imprecisión que aparece en las llegadas y el tiempo de servicio de los barcos. (iii) Usar metaheurísticas con optimización difusa con el fin de solucionar en forma más eficiente el BAP difuso.

## REFERENCIAS

1. BUHRKAL, Katja, et al. "Models for the discrete berth allocation problem: a computational comparison". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2011, vol. 47, núm 4, pp. 461-473.





2. U.N. Publications. Review of maritime transport. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), 2013, pp. 23–24.
3. STEENKEN, Dirk; VOß, Stefan. “Container terminal operation and operations research a classification and literature review”. OR spectrum, 2004, vol. 26, núm 1, pp. 3-49.
4. LIM, Andrew. “The berth planning problem”. Operations research letters, 1998, vol. 22, núm 2, pp. 105-110.
5. D. Consultants. “The drewry container shipper insight–third quarter”. Drewry Shipping Consultants, 2008. pp. 83.
6. DAI, Jam, et al. “Berth allocation planning optimization in container terminals”. En Supply chain analysis. Springer US, 2008. pp. 69-104.
7. ZIMMERMANN, Hans. “Fuzzy set theory and its applications”. Springer, 2001.
8. BIERWIRTH, Christian; MEISEL, Frank. “A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals”. European Journal of Operational Research, 2010, vol. 202, núm 3, pp. 615-627.
9. STAHLBOCK, Robert; VOß, Stefan. “Operations research at container terminals: a literature update”. Or Spectrum, 2008, vol. 30, núm 1, pp. 1-52.
10. SEYED, Hoseini; DAMGHANI, Khalili. “Fuzzy containers allocation problem in maritime terminals”. International Journal of Business Research, 2009, vol. 9, núm 4, pp 323-336.
11. MELIÁN-BATISTA, Belén; MORENO-VEGA, Marcos; VERDEGAY GALDEANO, José Luis. “Una primera aproximación al problema de asignación de atraques con tiempos de llegada difusos”. XV Congreso Español Sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy, 2010, pp. 37 - 42.
12. LAI, Young-Jou; HWANG, Ching-Lai. “Fuzzy Mathematical Programming: Methods and Applications”. Springer. 1992.
13. CHANAS, Stefan. “The use of parametric programming in fuzzy linear programming”. Fuzzy Sets and Systems, 1983, vol. 11, núm 1, pp. 229-241.
14. TANAKA, Hideo; TETSUJI, Okuda and KIYOJI Asai. “On fuzzy mathematical programming”. Journal Of Cybernetics, 1974, pp. 1974.
15. VERDEGAY, Jose. “Fuzzy mathematical programming”. Fuzzy information and decision processes, 1982, pp. 231- 237.
16. WERNERS, Brigitte. “An interactive fuzzy programming system”. Fuzzy Sets and Systems, 1987, vol. 23, núm 1, pp. 131 - 147.
17. KIM, Kap Hwan; MOON, Kyung Chan. “Berth scheduling by simulated annealing”. Transportation Research Part B: Methodological, 2003, vol. 37, núm 6, pp. 541-560.

## **SOBRE LOS AUTORES**

**Flabio Gutiérrez**, es Master en Ciencias de la Computación por la Universidad de Cantabria (ESPAÑA). Profesor principal del Dpto. de Matemática - Universidad Nacional de Piura (PERÚ). Investigador en inteligencia artificial. Socio fundador de la Sociedad Peruana de Inteligencia Artificial (SPIA).

**Mario Rodríguez**, es investigador en inteligencia artificial, scheduling y optimización, del Instituto de Automática e Informática Industrial de la Universidad Politécnica de Valencia (España).

**Federico Barber**, es Dr. en Informática, catedrático de Universidad, Investigador en inteligencia artificial, scheduling y optimización del Dpto. de Sistemas Informáticos y Computación - Universidad Politécnica de Valencia (España). Presidente de la Sociedad Iberoamericana de Inteligencia Artificial (IBERAMIA).

**Edmundo Vergara**, es Dr. en Ciencias Matemáticas - Universidad de Granada (ESPAÑA), profesor principal del Dpto. de Matemática - Universidad Nacional de Trujillo (PERU), Investigador en Optimización y Soft Computing . Miembro de la Sociedad Peruana de Matemática Aplicada y Computacional (SPMAC), Colegio de Matemáticos del Perú.