

# Resolución de un problema de optimización de consumo eléctrico en explotación de pozos por medio de metaheurísticas parametrizadas

José Matías Cutillas Lozano y Domingo Giménez  
Departamento de Informática y Sistemas, Universidad de Murcia

Luis Gabino Cutillas Lozano  
Aguas Municipalizadas de Alicante



# Contenidos

- 1 Motivación
- 2 El problema de optimización
- 3 Metaheurísticas unificadas paralelas
- 4 Resultados experimentales
- 5 Conclusiones

# La explotación de recursos hídricos

- La explotación de recursos hídricos tiene un coste de consumo eléctrico para bombear agua.
- Hay una serie de restricciones técnicas que se deben cumplir.
- Nuestro objetivo es aplicar un algoritmo que nos permita optimizar el coste de electricidad sujeto a las restricciones.
- Se mejora un problema inicial resuelto mediante algoritmos genéticos.
- Los métodos exhaustivos no son aplicables aquí debido a que el espacio de posibles soluciones es muy grande.
- Se ha usado técnicas metaheurísticas.

# La explotación de recursos hídricos

- La explotación de recursos hídricos tiene un coste de consumo eléctrico para bombear agua.
- Hay una serie de restricciones técnicas que se deben cumplir.
- Nuestro objetivo es aplicar un algoritmo que nos permita optimizar el coste de electricidad sujeto a las restricciones.
- Se mejora un problema inicial resuelto mediante algoritmos genéticos.
- Los métodos exhaustivos no son aplicables aquí debido a que el espacio de posibles soluciones es muy grande.
- Se ha usado técnicas metaheurísticas.

# La explotación de recursos hídricos

- La explotación de recursos hídricos tiene un coste de consumo eléctrico para bombear agua.
- Hay una serie de restricciones técnicas que se deben cumplir.
- Nuestro objetivo es aplicar un algoritmo que nos permita optimizar el coste de electricidad sujeto a las restricciones.
- Se mejora un problema inicial resuelto mediante algoritmos genéticos.
- Los métodos exhaustivos no son aplicables aquí debido a que el espacio de posibles soluciones es muy grande.
- Se ha usado técnicas metaheurísticas.

# La explotación de recursos hídricos

- La explotación de recursos hídricos tiene un coste de consumo eléctrico para bombear agua.
- Hay una serie de restricciones técnicas que se deben cumplir.
- Nuestro objetivo es aplicar un algoritmo que nos permita optimizar el coste de electricidad sujeto a las restricciones.
- Se mejora un problema inicial resuelto mediante algoritmos genéticos.
- Los métodos exhaustivos no son aplicables aquí debido a que el espacio de posibles soluciones es muy grande.
- Se ha usado técnicas metaheurísticas.

# La explotación de recursos hídricos

- La explotación de recursos hídricos tiene un coste de consumo eléctrico para bombear agua.
- Hay una serie de restricciones técnicas que se deben cumplir.
- Nuestro objetivo es aplicar un algoritmo que nos permita optimizar el coste de electricidad sujeto a las restricciones.
- Se mejora un problema inicial resuelto mediante algoritmos genéticos.
- Los métodos exhaustivos no son aplicables aquí debido a que el espacio de posibles soluciones es muy grande.
- Se ha usado técnicas metaheurísticas.

# La explotación de recursos hídricos

- La explotación de recursos hídricos tiene un coste de consumo eléctrico para bombear agua.
- Hay una serie de restricciones técnicas que se deben cumplir.
- Nuestro objetivo es aplicar un algoritmo que nos permita optimizar el coste de electricidad sujeto a las restricciones.
- Se mejora un problema inicial resuelto mediante algoritmos genéticos.
- Los métodos exhaustivos no son aplicables aquí debido a que el espacio de posibles soluciones es muy grande.
- Se ha usado técnicas metaheurísticas.

# Metaheurísticas parametrizadas paralelas

- Se han llevado a cabo experimentos con varios parámetros y funciones para adaptar la metaheurística a nuestro problema.
- Se requieren muchos experimentos para seleccionar una buena metaheurística y adaptarla al problema.
- Se resolverán un gran número de problemas de optimización.
- Utilizamos un esquema unificado parametrizado paralelo de metaheurísticas:  
Se paralelizan diferentes metaheurísticas obtenidas del esquema parametrizado con parámetros paralelos para optimizar el tiempo de ejecución.

# Metaheurísticas parametrizadas paralelas

- Se han llevado a cabo experimentos con varios parámetros y funciones para adaptar la metaheurística a nuestro problema.
- Se requieren muchos experimentos para seleccionar una buena metaheurística y adaptarla al problema.
- Se resolverán un gran número de problemas de optimización.
- Utilizamos un esquema unificado parametrizado paralelo de metaheurísticas:  
Se paralelizan diferentes metaheurísticas obtenidas del esquema parametrizado con parámetros paralelos para optimizar el tiempo de ejecución.

# Metaheurísticas parametrizadas paralelas

- Se han llevado a cabo experimentos con varios parámetros y funciones para adaptar la metaheurística a nuestro problema.
- Se requieren muchos experimentos para seleccionar una buena metaheurística y adaptarla al problema.
- Se resolverán un gran número de problemas de optimización.
- Utilizamos un esquema unificado parametrizado paralelo de metaheurísticas:  
Se paralelizan diferentes metaheurísticas obtenidas del esquema parametrizado con parámetros paralelos para optimizar el tiempo de ejecución.

# Metaheurísticas parametrizadas paralelas

- Se han llevado a cabo experimentos con varios parámetros y funciones para adaptar la metaheurística a nuestro problema.
- Se requieren muchos experimentos para seleccionar una buena metaheurística y adaptarla al problema.
- Se resolverán un gran número de problemas de optimización.
- Utilizamos un esquema unificado parametrizado paralelo de metaheurísticas:  
Se paralelizan diferentes metaheurísticas obtenidas del esquema parametrizado con parámetros paralelos para optimizar el tiempo de ejecución.

- El sistema hídrico: una serie de bombas ( $B$ ) de potencia conocida, que extraen un flujo de agua de sus correspondientes pozos a lo largo de un rango de tiempo diario ( $R$ ).
- Las bombas, que pueden estar en funcionamiento o fuera de servicio en un instante dado, operan eléctricamente y la electricidad tiene un coste diario que deberá ser minimizado:

$$C_e = \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^B T_i P_j N_i X_{ij} \quad (1)$$

- $C_e$ : coste de la electricidad consumida por la combinación de bombas seleccionada en un día.
- $T_i$ : coste de la electricidad en el rango  $i$ .
- $N_i$ : número de horas de bombeo en el intervalo de tiempo  $i$ .
- $P_j$ : potencia de la bomba  $j$ .
- $x_{ij}$ : tiene un valor de 1 o 0 según la bomba esté encendida o apagada.

- Individuo (notación algoritmos evolutivos): vector binario de tamaño  $B \cdot R$  que codifica el conjunto de bombas distribuido en diferentes instantes de tiempo.
- No todas las combinaciones posibles producen individuos factibles, y cada vez que un individuo es generado o modificado se evalúan cinco restricciones:
  - Satisfacción de la demanda.
  - Mantenimiento del caudal mínimo.
  - Cumplimiento con los volúmenes máximos de explotación.
  - Mantenimiento de la conductividad media debajo del límite.
  - Respetar las profundidades máximas de los niveles dinámicos.
- Obtener un nuevo individuo, en algunos casos, consume tiempo. Y para grandes explotaciones el número de pozos y rangos horarios puede ser grande.
- Usamos un esquema parametrizado en memoria compartida para aplicar eficientemente diferentes metaheurísticas.

- Individuo (notación algoritmos evolutivos): vector binario de tamaño  $B \cdot R$  que codifica el conjunto de bombas distribuido en diferentes instantes de tiempo.
- No todas las combinaciones posibles producen individuos factibles, y cada vez que un individuo es generado o modificado se evalúan cinco restricciones:
  - Satisfacción de la demanda.
  - Mantenimiento del caudal mínimo.
  - Cumplimiento con los volúmenes máximos de explotación.
  - Mantenimiento de la conductividad media debajo del límite.
  - Respetar las profundidades máximas de los niveles dinámicos.
- Obtener un nuevo individuo, en algunos casos, consume tiempo. Y para grandes explotaciones el número de pozos y rangos horarios puede ser grande.
- Usamos un esquema parametrizado en memoria compartida para aplicar eficientemente diferentes metaheurísticas.

- Individuo (notación algoritmos evolutivos): vector binario de tamaño  $B \cdot R$  que codifica el conjunto de bombas distribuido en diferentes instantes de tiempo.
- No todas las combinaciones posibles producen individuos factibles, y cada vez que un individuo es generado o modificado se evalúan cinco restricciones:
  - Satisfacción de la demanda.
  - Mantenimiento del caudal mínimo.
  - Cumplimiento con los volúmenes máximos de explotación.
  - Mantenimiento de la conductividad media debajo del límite.
  - Respetar las profundidades máximas de los niveles dinámicos.
- Obtener un nuevo individuo, en algunos casos, consume tiempo. Y para grandes explotaciones el número de pozos y rangos horarios puede ser grande.
- Usamos un esquema parametrizado en memoria compartida para aplicar eficientemente diferentes metaheurísticas.

- Individuo (notación algoritmos evolutivos): vector binario de tamaño  $B \cdot R$  que codifica el conjunto de bombas distribuido en diferentes instantes de tiempo.
- No todas las combinaciones posibles producen individuos factibles, y cada vez que un individuo es generado o modificado se evalúan cinco restricciones:
  - Satisfacción de la demanda.
  - Mantenimiento del caudal mínimo.
  - Cumplimiento con los volúmenes máximos de explotación.
  - Mantenimiento de la conductividad media debajo del límite.
  - Respetar las profundidades máximas de los niveles dinámicos.
- Obtener un nuevo individuo, en algunos casos, consume tiempo. Y para grandes explotaciones el número de pozos y rangos horarios puede ser grande.
- Usamos un esquema parametrizado en memoria compartida para aplicar eficientemente diferentes metaheurísticas.

# Objetivos

- Obtener una herramienta para aplicar de manera eficiente y adaptar metaheurísticas al problema de optimización de recursos hídricos.
- Hemos desarrollado esquemas parametrizados paralelos de metaheurísticas:
  - GRASP, Algoritmos Genéticos, Búsqueda Dispersa y combinaciones/hibridaciones
  - en memoria compartida: OpenMP con funciones parametrizadas paralelas.
- Se ha experimentado la autooptimización del esquema paralelo, para la selección automática del número de hilos óptimo.

# Objetivos

- Obtener una herramienta para aplicar de manera eficiente y adaptar metaheurísticas al problema de optimización de recursos hídricos.
- Hemos desarrollado esquemas parametrizados paralelos de metaheurísticas:
  - GRASP, Algoritmos Genéticos, Búsqueda Dispersa y combinaciones/hibridaciones
  - en memoria compartida: OpenMP con funciones parametrizadas paralelas.
- Se ha experimentado la autooptimización del esquema paralelo, para la selección automática del número de hilos óptimo.

# Objetivos

- Obtener una herramienta para aplicar de manera eficiente y adaptar metaheurísticas al problema de optimización de recursos hídricos.
- Hemos desarrollado esquemas parametrizados paralelos de metaheurísticas:
  - GRASP, Algoritmos Genéticos, Búsqueda Dispersa y combinaciones/hibridaciones
  - en memoria compartida: OpenMP con funciones parametrizadas paralelas.
- Se ha experimentado la autooptimización del esquema paralelo, para la selección automática del número de hilos óptimo.

# Esquema parametrizado paralelo

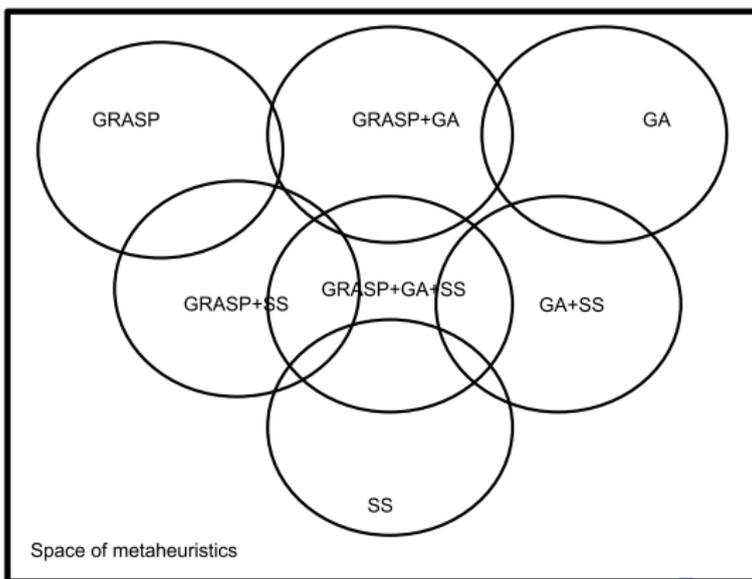
```
Inicializar( $S$ , ParamIni, ThreadsIni)
mientras (no CondiciondeFin( $S$ , ParamFin, ThreadsFin))
     $SS$  = Seleccionar( $S$ , ParamSel, ThreadsSel)
     $SS1$  = Combinar( $SS$ , ParamCom, ThreadsCom)
     $SS2$  = Mejorar( $SS1$ , ParamMej, ThreadsMej)
     $S$  = Incluir( $SS2$ , ParamInc, ThreadsInc)
```

Paralelización independiente de las funciones,  
con **parámetros de paralelismo** (número de hilos) para cada  
función.

El valor óptimo de los **parámetros de paralelismo** depende de los  
valores de los **parámetros de la metaheurística** (o la combinación  
de metaheurísticas).

# Metaheurísticas

- Metaheurísticas puras: GRASP, Algoritmos genéticos (GA), Búsqueda dispersa (SS)
- Combinaciones: GRASP+GA, GRASP+SS, GA+SS, GRASP+GA+SS



Identificamos funciones con el mismo esquema paralelo:

Esquema paralelo de un nivel (esquema 1)

un-nivel(ParamMetaheur):

```
omp_set_num_threads(threads – un – nivel(ParamMetaheur))
```

```
#pragma omp parallel for
```

```
bucle en elementos
```

```
    tratar elemento
```

p.ej.: Inicializar, Combinar...

## Esquema paralelo de dos niveles (esquema 2)

dos-niveles(ParamMetaheur) :

```
omp_set_num_threads(threads – primer – nivel(ParamMetaheur))
```

```
#pragma omp parallel for
```

```
bucle en elementos
```

```
segundo-nivel(ParamMetaheur, threads – primer – nivel)
```

segundo-nivel(ParamMetaheur, *threads* – *primer* – nivel):

```
omp_set_num_threads(threads – segundo –
```

```
nivel(ParamMetaheur, threads – primer – nivel))
```

```
#pragma omp parallel for
```

```
bucle en vecinos
```

```
tratar vecino
```

p.ej.: Inicializar, Mejorar...

Se pretende mejorar la función de bondad mediante búsqueda y mejora locales.

# Sistema computacional

Ben-Arabí (Centro de Supercomputación de Murcia):

- Ben: HP Integrity Superdome SX2000 con 128 núcleos del procesador Intel Itanium-2 dual-core Montvale.
- Arabi: clúster de 102 nodos, cada uno con 8 núcleos del procesador Intel Xeon Quad-Core L5450 (un nodo usado).

# Parámetros

Parámetros de las metaheurísticas y combinaciones de metaheurísticas utilizados en los experimentos:

	GRASP	GA	SS	GRASP+GA	GRASP+SS	GA+SS	GRASP+GA+SS
NEIni	200	100	100	200	100	200	200
NEFIni	1	100	20	100	50	20	50
PEMIni	100	0	100	100	100	100	100
IMEIni	10	0	10	10	10	10	10
NEMSel	0	100	10	100	25	10	25
NEPSel	0	0	10	0	25	25	25
NMMCom	0	50	90	50	90	90	90
NMPCom	0	0	100	0	100	100	100
NPPCom	0	0	90	0	90	90	90
PEBMej	0	0	100	0	100	100	100
IMBMej	0	0	5	0	5	5	5
PEMMej	0	10	0	10	10	0	10
IMMMej	0	5	0	5	5	0	5
NEMInc	0	100	10	100	25	10	25

# Variables del problema

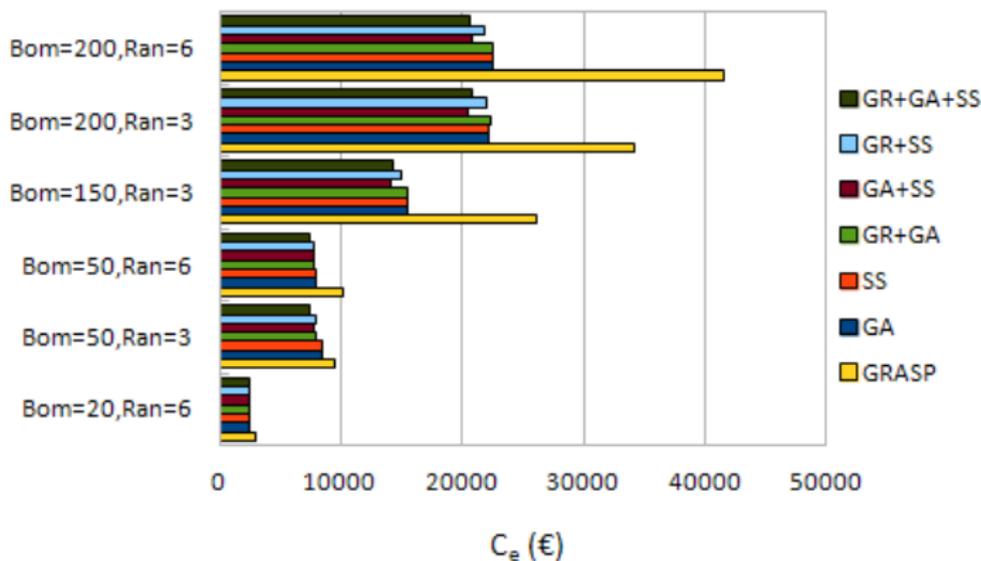
Valores de las variables de los problemas consideradas en los experimentos:

$B, R$	20,6	50,3	50,6	150,3	200,3	200,6
$VT \cdot 10^{-4}$	4	10	10	25	35	35
$CT \cdot 10^{-2}$	10	25	25	80	90	90
CA	[40,300]	[40,300]	[40,300]	[40,300]	[40,300]	[40,300]
P	[30,400]	[30,400]	[30,400]	[30,400]	[30,400]	[30,400]
$CM \cdot 10^{-2}$	25	25	25	25	25	25
$CO \cdot 10^{-2}$	[1,30]	[1,30]	[1,30]	[1,30]	[1,30]	[1,30]
$VM \cdot 10^{-3}$	[1,10]	[3,10]	[3,10]	[5,15]	[10,20]	[10,20]
PD	[150,300]	[150,300]	[150,300]	[150,300]	[150,300]	[150,300]
PM	[250,350]	[230,350]	[230,350]	[250,350]	[230,350]	[230,350]

VT: volumen total acumulado diario ( $m^3$ ), CT: caudal total mínimo ( $m^3/h$ ), CA: caudales ( $m^3/h$ ), P: potencias (Kw), CMP: conductividad máxima permitida ( $\mu S/cm$ ), CO: conductividades ( $\mu S/cm$ ), VM: volúmenes máximos concedidos diarios ( $m^3$ ), PD: profundidades del nivel dinámico de cada pozo (m) y PM: profundidades del nivel dinámico máximas (m). Tarifas eléctricas ( $\text{€}/(\text{Kw}\cdot\text{h})$ ): 0.168, 0.112 y 0.056.

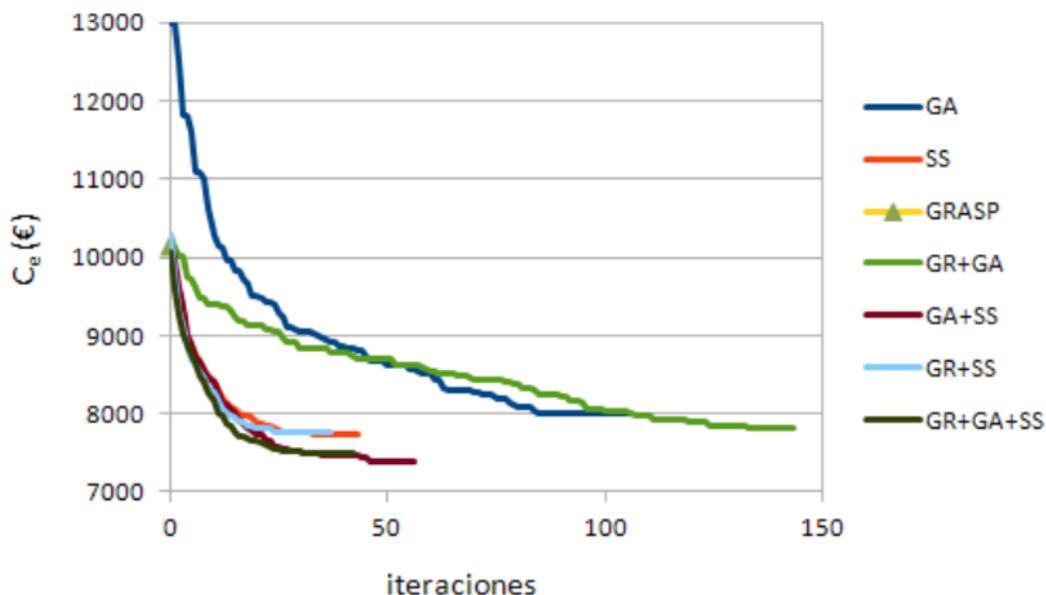
## Resultados secuenciales

Se mejoran los resultados obtenidos inicialmente con algoritmos genéticos. Función de bondad para las metaheurísticas y combinaciones estudiadas y varios tamaños de problema



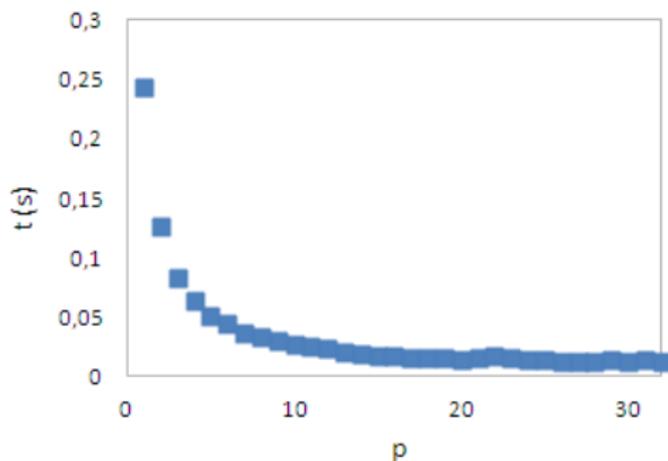
## Resultados secuenciales

Valores de coste óptimos obtenidos por las diferentes metaheurísticas en sucesivas iteraciones, para el problema con 50 bombas y 6 franjas horarias



## Experimentos paralelos. Paralelismo de un nivel

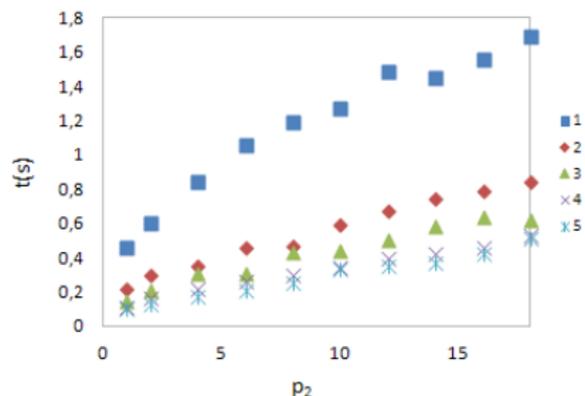
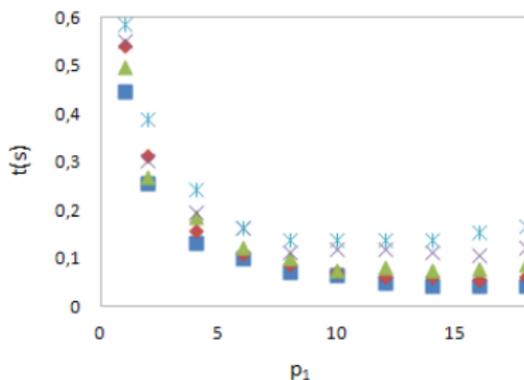
Combinación de parámetros de la metaheurística:  $NEIni=100$ ,  $PEMIni=50$ ,  $IMEIni=10$  y tamaño del problema: 200,24 (para los dos tipos de paralelismo).



Función: GenerarConjuntoInicial. El comportamiento de todas las funciones con paralelismo de un nivel es similar.

# Paralelismo de dos niveles

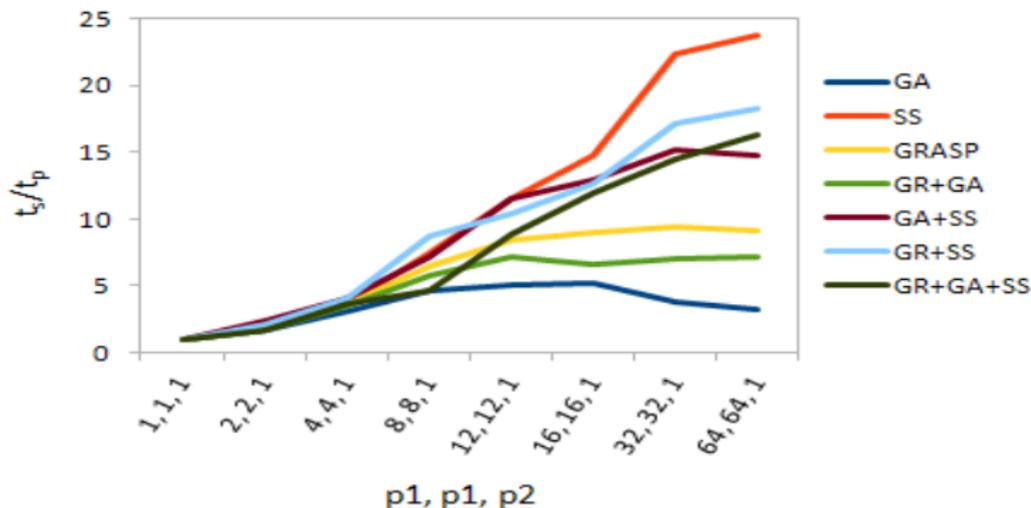
## Paralelismo de dos niveles para MejorarElementos.



- Idéntico comportamiento en la función Mutar.
- El paralelismo anidado no mejora el tiempo de ejecución: sólo contribuye a la búsqueda y mejora en el vecindario de individuos.

# Resultados ejecución total en paralelo

Speedup para cada metaheurística lanzando distinto número de hilos. Problema: B=50, R=6.

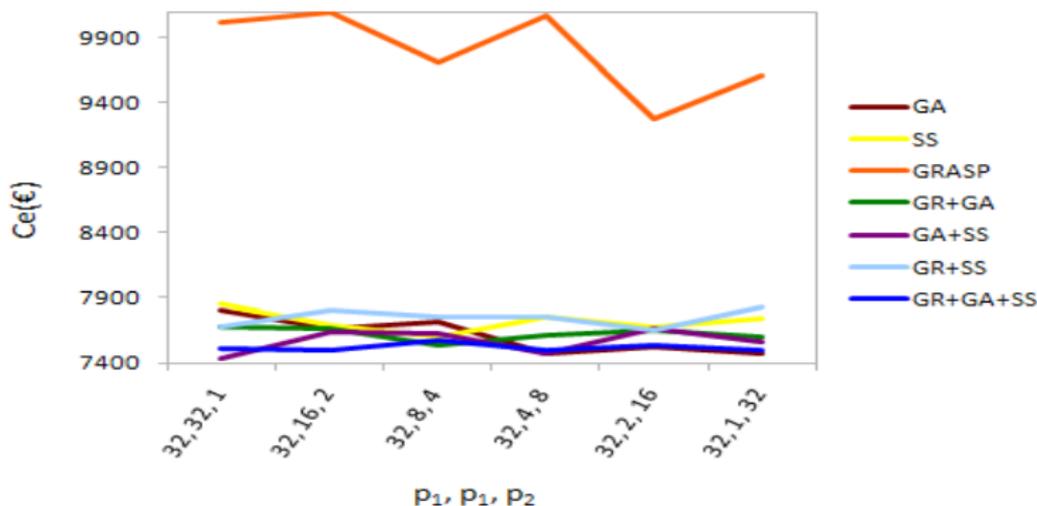


Se mejora el tiempo secuencial:

- GA, GR+GA, GA+SS y GRASP: máximo speedup en 16 a 32 hilos,
- SS, GR+SS y GR+GA+SS: máximo speedup por encima de 64 hilos.

# Resultados ejecución total en paralelo

Función de bondad para cada metaheurística lanzando distinto número de hilos de segundo nivel. Problema: B=50, R=6.



La mejora en la función objetivo es pequeña en todas las metaheurísticas respecto a los experimentos secuenciales

# Conclusiones

- Aplicación satisfactoria de un esquema unificado parametrizado de metaheurísticas a nuestro problema de optimización de costes en la explotación de pozos.
- Los mejores resultados secuenciales, en cuanto a función de bondad, se obtienen con la combinación de metaheurísticas GA+SS y GR+GA +SS, mejorándose los resultados iniciales con algoritmos genéticos.
- Se han realizado experimentos paralelos orientados a mejorar los resultados alcanzados en la versión secuencial. No sólo se ha mejorado el tiempo de ejecución, sino también la función de bondad aunque en menor medida.

## Trabajo futuro

- Inclusión de más metaheurísticas puras (Tabú, Colonia de Hormigas, Nubes de Partículas...).
- Diseño de hiperheurísticas para seleccionar automáticamente los valores de las metaheurísticas para un problema particular.
- Inclusión de autooptimización en el esquema paralelo, con algún motor para la selección automática del número de hilos.
- Desarrollar esquemas unificados paralelos para otros sistemas computacionales (paso de mensajes, híbridos, GPU...).