



Universitat de Girona

# AVALUACIÓ DEL PARADIGMA D'AGENTS EN LA GESTIÓ D'UN SISTEMA COMPLEX D'AIGÜES RESIDUALS

**Marta VERDAGUER PLANAS**

**Dipòsit legal: GI. 72-2013**

<http://hdl.handle.net/10803/97128>

**ADVERTIMENT.** L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

**ADVERTENCIA.** El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

**WARNING.** Access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.



Universitat de Girona

TESI DOCTORAL

AVALUACIÓ DEL PARADIGMA D'AGENTS EN LA GESTIÓ D'UN SISTEMA  
COMPLEX D'AIGÜES RESIDUALS

Marta Verdaguer Planas

2012

CIÈNCIES EXPERIMENTALS I SOSTENIBILITAT

Dirigida per: Dr. Manel Poch Espallargas i Dr. Narcís Clara Lloret

Memòria presentada per optar al títol de doctora per la Universitat de Girona





Universitat de Girona

El Dr. Manel Poch Espallargas, Catedràtic d'Universitat del Departament d'Enginyeria Química, Agrària i Tecnologia Agroalimentària de la Universitat de Girona i el Dr. Narcís Clara Lloret, Professor Titular d'Escola Universitària del Departament d'Informàtica i Matemàtica Aplicada de la Universitat de Girona,

CERTIFIQUEN:

Que el treball titulat "Avaluació del paradigma d'agents en la gestió d'un sistema complex d'aigües residuals", que presenta Marta Verdaguer Planas per a l'obtenció del títol de doctora, ha estat realitzat sota la seva direcció.

Dr. Manel Poch Espallargas

Dr. Narcís Clara Lloret

Girona, a 23 d'octubre de 2012.



*A en Jordi, a qui sempre recordarem*

### **Agraïments**

Vull agrair a la Universitat de Girona el desplegament del Pla de Desenvolupament Professional, que m'ha permès seguir aquesta etapa de formació en unes condicions favorables, i als meus companys, per la seva solidaritat i bona voluntat. Molt particular i sincerament, vull donar les gràcies, als meus directors, per haver-me ofert l'oportunitat de realitzar aquesta tesi, desenvolupar-la en un entorn immillorable i comptar en tot moment amb el seu suport. Moltes gràcies.

Esta tesis ha sido realizada en el marco del proyecto ENDERUS (CTM2009-13018) con financiación del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO).

## Resum

L'anàlisi del sistema de sanejament mostra un sistema dinàmic, amb característiques de funcionament distribuïdes i on hi ha presents objectius d'abast global i individuals dels components. Addicionalment, existeixen interaccions entre components i amb l'entorn, per la qual cosa la modelització de la gestió esdevé una tasca complexa. Per gestionar aquest tipus de sistemes complexos, una eina computacional adequada són els sistemes d'ajut a la decisió, entre els quals, es defineixen com a autònoms els que basen la seva conceptualització en l'aplicació del paradigma d'agents i sistemes multiagent.

Aquest document presenta i avalua l'aplicació del paradigma d'agents i sistemes multiagent a la gestió d'un sistema d'aigües residuals urbanes. La conceptualització global del sistema es realitza a partir del desenvolupament dels models d'agents i d'enllaços de comunicació, els quals, per la seva part, han sorgit de l'abstracció de funcions i interaccions. En el desenvolupament, s'ha evidenciat que la coordinació, entre totes les aportacions d'aigües residuals al tractament i la capacitat disponible d'aquest, constitueix un punt clau del funcionament del sistema. A més, per als sistemes amb una aportació elevada d'aigües residuals d'origen industrial, la casuística de les diferents dinàmiques de generació pot produir sobrecàrregues importants al tractament, que cal evitar si no se'n vol comprometre l'eficàcia. Per tal de tractar aquesta problemàtica, es defineix un agent Coordinador, el qual es dissenya per executar (emprant volums i càrregues contaminants) dues funcions bàsiques: la coordinació entre les aportacions d'aigües residuals d'origen domèstic, pluvial i industrial, i la prioritització dels efluent industrial quan el tractament no disposa de capacitat suficient per admetre totes les propostes d'aportacions d'aigües residuals industrials.

El procés de prioritització s'ha especificat per assolir una òptima combinació de descàrregues d'aigua residual industrial i, alhora, evitar sobrecàrregues al sistema de tractament, per la qual cosa s'ha plantejat com un problema d'optimització combinatòria (de les descàrregues d'aigües residuals industrials) amb múltiples restriccions (del volum i les càrregues de contaminants admissibles en el tractament) i amb una funció objectiu de cost a maximitzar. Es proposa la seva resolució mitjançant una metaheurística d'optimització de colònia de formigues, la qual s'ha instanciat mitjançant quatre versions algorísmiques diferents. S'ha calibrat cada versió i se n'ha avaluat el comportament (a través de l'execució de simulacions sobre els escenaris del cas d'estudi) referent a la solució de descàrrega total obtinguda i a la distribució de les descàrregues, per tal de concloure que s'han assolit els objectius del procés.

Per últim, s'ha procedit a la implementació de l'agent Coordinador en el context multiagent. Les simulacions del funcionament s'han executat en cicles consecutius sobre diferents escenaris, que han inclòs les dades importades d'altres agents, amb la conclusió de que s'han assolit els objectius d'implementació i execució de l'agent Coordinador.

La conclusió de la recerca efectuada mostra les bones perspectives que ofereix l'aplicació del paradigma d'agents i sistemes multiagent en la gestió del sistema de sanejament.





## Resumen

El análisis del sistema de saneamiento muestra un sistema dinámico, con características de funcionamiento distribuidas y donde hay presentes objetivos de ámbito global e individuales de los componentes. Adicionalmente, existen interacciones entre componentes y con el entorno, por lo que la modelización de la gestión resulta una tarea compleja. Para gestionar este tipo de sistemas complejos, un recurso computacional adecuado son los sistemas de ayuda a la decisión, entre los cuales, se definen como autónomos los que basan su conceptualización en la aplicación del paradigma de agentes y sistemas multiagente.

Este documento presenta y evalúa la aplicación del paradigma de agentes y sistemas multiagente a la gestión de un sistema de aguas residuales urbanas. La conceptualización global del sistema se realiza a partir del desarrollo de los modelos de agentes y de enlaces de comunicación, los cuales, por su parte, han surgido de la abstracción de funciones e interacciones. En el desarrollo se ha evidenciado que la coordinación, entre las aportaciones de aguas residuales al tratamiento y la capacidad disponible de éste, constituye un factor clave del funcionamiento del sistema. Adicionalmente, para los sistemas que presentan un elevado aporte de aguas residuales de origen industrial, la casuística de las distintas dinámicas de generación puede conllevar sobrecargas importantes al tratamiento, las cuales es preciso evitar si no se desea comprometer su eficacia. Para tratar esta problemática se ha definido un agente Coordinador, el cual se ha diseñado para ejecutar (utilizando volúmenes y cargas contaminantes) dos funciones básicas: la coordinación entre las aportaciones de aguas residuales de origen doméstico, pluvial e industrial y la priorización de los efluentes industriales cuando el tratamiento no dispone de capacidad suficiente para admitir todas las propuestas de aportaciones de aguas residuales industriales.

El proceso de priorización se ha especificado para conseguir una óptima combinación de descargas de agua residual industrial y evitar sobrecargas en el sistema de tratamiento, por ello se ha planteado como un problema de optimización combinatoria (de las descargas de aguas residuales industriales) con múltiples restricciones (del volumen y las cargas contaminantes admisibles en el tratamiento) y con una función objetivo de coste a maximizar. Se propone su resolución mediante una metaheurística de optimización de colonia de hormigas, la cual se ha instanciado mediante cuatro versiones algorítmicas distintas. Cada versión ha sido calibrada y se ha valorado su comportamiento (ejecutando simulaciones en los escenarios del caso de estudio) en relación con la solución de descarga total obtenida y con la distribución de las descargas, para concluir que se han alcanzado los objetivos del proceso.

Finalmente, se ha procedido a la implementación del agente Coordinador en el contexto multiagente. Las simulaciones del funcionamiento se han ejecutado en ciclos sucesivos sobre distintos escenarios, que han incluido los datos importados de otros agentes, con la conclusión de que se han logrado los objetivos de implementación y ejecución del agente Coordinador.

La conclusión de la investigación efectuada revela prometedoras perspectivas en la aplicación del paradigma de agentes y sistemas multiagente a la gestión del sistema de saneamiento.



## Abstract

The analysis of the urban wastewater system (UWS) shows that it is a dynamic system, with distributed characteristics and where there are goals of global reach and of individual components. In addition, there are intertwined factors among the components, as well as with the environment. For these reasons, modelling the UWS management becomes a complex task. In order to manage these types of complex systems, an adequate computational tool would be the decision support systems, among which, those whose conceptualisation is based on the application of the paradigm of agents and multi-agent systems are defined as autonomous.

This document presents and evaluates the application of the paradigm of agents and multi-agent systems to the management of the UWS. A global conceptualisation of the system is carried out starting from the development of the models of agents and communication paths, which have arisen out of the abstractions of functions and interactions. In the course of this research, it has become obvious that coordination between all the wastewater treatment inputs and the available capacity of the treatment is a key point in the performance of the system. Moreover, for systems with a large quantity of incoming wastewater from industrial activities, it must be taken into account that there can be a significant overloading of the treatment, being a consequence of the variability of the different dynamics of generation, and that there is a need to avoid this if the treatment efficiency is not to be compromised. To deal with the problem, a Coordinating agent is defined, which has been designed to carry out (using volumes and pollutant loads) two basic functions: the coordination between the wastewater from household, runoff and industrial activities, and the prioritisation of industrial wastewaters when sufficient capacity is not available to admit all the different inflows of industrial wastewaters.

The prioritisation process has been specified as achieving an optimum combination of industrial wastewater discharges while at the same time avoiding overloads to the treatment system, which has been considered a combinatorial optimisation problem (of industrial wastewater discharges) with multiple constraints (from the available treatment capacity, in volume and pollutant loads) and with an objective function of cost to maximise. The proposal is to solve this problem by a meta-heuristic of ant colony optimisation, which has been instantiated by four different algorithmic versions. Each version has been calibrated and its behaviour has been evaluated (executing simulations on the scenarios of the case study), relative to the solution of the global discharge obtained and that of the distribution of discharges, with the conclusion that the aims of the process have been achieved.

Finally, we have implemented the Coordinating agent within the multi-agent context. The simulations have been executed in consecutive cycles, for different scenarios, which have included the imported data from other agents. The conclusion is that both the implementation and execution of the Coordinating agent have been achieved.

The research developed indicates a promising future for the application of the paradigm of agents and multi-agent systems in managing the UWS.



## **ARTICLES I APORTACIONS A CONGRESSOS**

Verdaguer M, Clara N, Poch M. Ant Colony Optimization-based method for managing industrial influents in wastewater systems. *AICHE Journal*. 2012; 58(10):3070-3079.

Verdaguer M, Giró J, Clara N, Poch M. How ant systems can help in management of pH for industrial wastewater discharges. 7<sup>th</sup> International Conference on Swarm Intelligence. 2010; 8-10 September, Brussels, Belgium. In: Dorigo M, Birattari M, Di Caro GA, Doursat R, Engelbrecht AP, Groß R, Sahin E, Stützle T, Sayama H Editors. *Swarm Intelligence*. Book Series: *Lecture Notes in Computer Science*, 6234:566-567. 2010.

Verdaguer, M., Aulinas, M., Clara N. and Poch, M. Integrating swarm intelligence in a multi-agent system for wastewater discharges management. 5th IEEE International Conference on Intelligent Systems IS 2010 , pp.444-449, 7-9 July 2010. DOI: 10.1109/IS.2010.5548341

Verdaguer M, Aulinas M, Clara N, Poch M. Multi-agent system approach for an integrated urban wastewater management. World Congress on Engineering WCE 010: International Conference of Computational Intelligence and Intelligent Systems (ICCIIS'10). 30 Juny-2 Juliol, London. In: Ao SI, Gelman L, Hukins DWL, Hunter A, Korsunsky AM editors. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, 2183:77-82. 2010.

Verdaguer M, Aulinas M, Escribano P, Poch M. Application of agent's paradigm to manage the urban wastewater system. In the Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Agents and Artificial Intelligence ICAART; 19-21 January 2009, Porto, Portugal. In: Fred A. editor: 497-500. 2009.



# Índex

	Pàg.
1. Introducció.....	1
Context, plantejament i hipòtesis de treball .....	5
Aportació que suposa la tesi .....	7
Estructura del document.....	8
2. Plantejament de l'objecte de la recerca.....	9
2.1. Gestió integrada del sistema d'aigües residuals urbanes.....	9
2.2. Característiques de funcionament.....	13
2.3. Els efluents industrials. Problemàtica .....	16
3. Metodologia.....	19
3.1. Paradigma d'agents i sistemes multiagent.....	19
3.2. Cas d'estudi del sistema multiagent.....	25
3.2.1. Rols i interaccions.....	28
3.2.2. Model d'agents .....	38
3.2.3. Estructura organitzativa.....	39
3.2.4. Model d'enllaços de comunicacions dels agents.....	40
3.2.5. Diagrama de funcionament global.....	43
3.3. L'agent Coordinador.....	47
3.3.1. Coordinació d'abocaments. Priorització d'efluents industrials.....	47
3.3.2. Procés d'optimització combinatòria.....	50
Mètodes de resolució. Estat de la tècnica i selecció .....	50
Plantejament del problema.....	54



	Pàg.
3.3.3. Algorismes ACO. Propostes <i>sP</i> , <i>gP</i> , <i>MM</i> i <i>Hc</i> .....	57
Antecedents.....	58
Característiques de les versions algorísmiques <i>sP</i> , <i>gP</i> , <i>MM</i> i <i>Hc</i> .....	61
3.3.3.1. Fase de construcció de solucions.....	66
Actualització de feromona amb ús de penalitzacions.....	67
Actualització de feromona amb ús de valors límit.....	69
3.3.3.2. Fase de millora de la solució construïda.....	73
4. Resultats i discussió.....	75
4.1. Priorització dels efluent industrial.....	75
4.1.1. Definició d'escenaris.....	77
4.1.2. Procés de calibratge.....	80
4.1.3. Resultats i discussió del cas d'estudi.....	91
4.2. Implementació de l'agent Coordinador en el context multiagent.....	109
4.2.1. Definició d'escenaris.....	111
4.2.2. Resultats i discussió de l'execució.....	115
5. Conclusions.....	127
Treball futur.....	130
Annex I. Escenaris alternatius del cas d'estudi ACO.....	131
Annex II. Escenaris dels cicles, segon i successius, d'execució de l'agent Coordinador.....	133
Bibliografia.....	143

Apèndix (en CD adjunt):

Taules detallades dels resultats obtinguts en les simulacions ACO

## LLISTAT DE FIGURES

	Pàg.
1.1. Diagrama esquemàtic d'un sistema d'aigües residuals.....	4
2.1. Estructuració del sistema d'aigües residuals urbanes.....	15
3.1. Diagrama de flux del cas d'estudi.....	27
3.2. Diagrama de funcions bàsiques del sistema d'aigües residuals urbanes.....	29
3.3. Diagrama de rols i interaccions.....	31
3.4. Esquema d'un agent i de les seves interaccions.....	32
3.5. Model d'agents.....	38
3.6. Estructura organitzativa dels agents.....	39
3.7. Diagrama d'enllaços comunicatius dels agents.....	42
3.8. Diagrama de funcionament global.....	45
3.9. Diagrama de funcionament de l'agent Coordinador.....	49
3.10. Evolució del valor del coeficient $K_i$ amb el volum de descàrrega.....	56
3.11. Representació esquemàtica del graf bipartit.....	62
3.12. Diagrama del procés de prioritització d'efluents industrials amb els itineraris (1) de les versions $sP$ , $gP$ i $Hc$ , i (2) de $MM$ .....	65
4.1. Protocol per a la realització de les simulacions.....	76
4.2. Resultats de $\bar{Z}$ obtinguts amb els valors de $\rho$ provats per a $sP$ i $gP$ .....	82
4.3. Evolució de les millors solucions construïdes amb la versió $sP$ .....	83
4.4. Evolució de les millors solucions construïdes amb la versió $gP$ .....	83
4.5. Resultats de $\bar{Z}$ obtinguts amb els valors de $\rho$ provats per a $MM$ .....	87
4.6. Evolució de les millors solucions construïdes amb la versió $MM$ .....	88
4.7. Resultats de $\bar{Z}$ obtinguts amb els valors de $\rho$ provats per a $Hc$ .....	90
4.8. Evolució de les millors solucions construïdes amb la versió $Hc$ .....	91
4.9. Descàrregues volumètriques assolides, mitjançant l'execució de $sP$ , $gP$ , $MM$ i $Hc$ , en l'escenari de referència.....	99

	Pàg.
4.10. Descàrregues de MES assolides, mitjançant l'execució de $sP, gP, MM$ i $Hc$ , en l'escenari de referència.....	99
4.11. Descàrregues de DBO assolides, mitjançant l'execució de $sP, gP, MM$ i $Hc$ , en l'escenari de referència.....	100
4.12. Descàrregues de DQO assolides, mitjançant l'execució de $sP, gP, MM$ i $Hc$ , en l'escenari de referència.....	100
4.13. Descàrregues de NT assolides, mitjançant l'execució de $sP, gP, MM$ i $Hc$ , en l'escenari de referència.....	101
4.14. Descàrregues de PT assolides, mitjançant l'execució de $sP, gP, MM$ i $Hc$ , en l'escenari de referència.....	101
4.15. Descàrregues volumètriques assolides, mitjançant l'execució de $sP, gP, MM$ i $Hc$ , en l'escenari 2.....	102
4.16. Descàrregues de MES assolides, mitjançant l'execució de $sP, gP, MM$ i $Hc$ , en l'escenari 2.....	102
4.17. Descàrregues de DBO assolides, mitjançant l'execució de $sP, gP, MM$ i $Hc$ , en l'escenari 2.....	103
4.18. Descàrregues de DQO assolides, mitjançant l'execució de $sP, gP, MM$ i $Hc$ , en l'escenari 2.....	103
4.19. Descàrregues de NT assolides, mitjançant l'execució de $sP, gP, MM$ i $Hc$ , en l'escenari 2.....	104
4.20. Descàrregues de PT assolides, mitjançant l'execució de $sP, gP, MM$ i $Hc$ , en l'escenari 2.....	104
4.21. Descàrregues volumètriques assolides, mitjançant l'execució de $sP, gP, MM$ i $Hc$ , en l'escenari 3.....	105
4.22. Descàrregues de MES assolides, mitjançant l'execució de $sP, gP, MM$ i $Hc$ , en l'escenari 3.....	105
4.23. Descàrregues de DBO assolides, mitjançant l'execució de $sP, gP, MM$ i $Hc$ , en l'escenari 3.....	106

	Pàg.
4.24. Descàrregues de DQO assolides, mitjançant l'execució de <i>sP</i> , <i>gP</i> , <i>MM</i> i <i>Hc</i> , en l'escenari 3.....	106
4.25. Descàrregues de NT assolides, mitjançant l'execució de <i>sP</i> , <i>gP</i> , <i>MM</i> i <i>Hc</i> , en l'escenari 3.....	107
4.26. Descàrregues de PT assolides, mitjançant l'execució de <i>sP</i> , <i>gP</i> , <i>MM</i> i <i>Hc</i> , en l'escenari 3.....	107
4.27. Diagrama de flux de l'execució de simulacions amb l'agent Coordinador.....	111
4.28. Resultats de descàrregues d'aigües residuals, per a cada activitat industrial, en tots els cicles d'execució.....	119
4.29. Resultats de descàrregues volumètriques normalitzades , per a cada activitat industrial, en tots els cicles d'execució.....	121
4.30. Descàrregues de MES assolides, per a cada activitat industrial, en tots els cicles d'execució.....	122
4.31. Descàrregues de DBO assolides, per a cada activitat industrial, en tots els cicles d'execució.....	122
4.32. Descàrregues de DQO assolides, per a cada activitat industrial, en tots els cicles d'execució.....	123
4.33. Descàrregues de NT assolides, per a cada activitat industrial, en tots els cicles d'execució.....	123
4.34. Descàrregues de PT assolides, per a cada activitat industrial, en tots els cicles d'execució.....	124



## LLISTAT DE TAULES

	Pàg.
3.1. Interaccions dels rols.....	34
3.2. Descripció d'activitats dels rols i interaccions en què prenen part.....	36
3.3. Valors del coeficient punta.....	55
4.1. Dades corresponents a les activitats industrials i a l'EDAR en l'escenari de referència.....	78
4.2. Característiques de les aigües residuals industrials en els escenaris 1, 2 i 3.....	79
4.3. Resultats obtinguts amb $sP$ ( $\alpha = 1, \beta = 0.8, a = 2, b = 15, \rho = 0.99$ i $Q = 1000$ ).....	84
4.4. Resultats obtinguts amb $gP$ ( $\alpha = 1, \beta = 0.8, a = 2, a_r = 2, b = 15, \rho = 0.99$ i $Q = 1000$ )..	85
4.5. Resultats de cost i descàrregues totals obtinguts amb $sP, gP, MM$ i $Hc$ en els escenaris de referència i alternatius.....	97
4.6. Dades corresponents a les propostes dels agents en el primer cicle d'execució de l'agent Coordinador.....	113
4.7. Dades relacionades amb les aigües residuals industrials (disponibilitat del tractament i previsió de les aportacions) a cada cicle d'execució de l'agent Coordinador.....	114
4.8. Resultats de les descàrregues d'aigües residuals industrials obtingudes a cada cicle d'execució de l'agent Coordinador.....	116
I.1. Escenari alternatiu 2.....	131
I.2. Escenari alternatiu 3.....	132
II.1. Escenari del cicle 2 d'execució de l'agent Coordinador.....	133
II.2. Escenari del cicle 3 d'execució de l'agent Coordinador.....	134
II.3. Escenari del cicle 4 d'execució de l'agent Coordinador.....	135
II.4. Escenari del cicle 5 d'execució de l'agent Coordinador.....	136
II.5. Escenari del cicle 6 d'execució de l'agent Coordinador.....	137
II.6. Escenari del cicle 7 d'execució de l'agent Coordinador.....	138
II.7. Escenari del cicle 8 d'execució de l'agent Coordinador.....	139
II.8. Escenari del cicle 9 d'execució de l'agent Coordinador.....	140
II.9. Escenari del cicle 10 d'execució de l'agent Coordinador.....	141



## LLISTAT D'ACRÒNIMS

ACO	Optimització de colònia de formigues
AS	<i>Ant System</i>
BLS	<i>Basic local search</i>
CE	<i>Cross-entropy</i>
DBO	Demanda bioquímica d'oxigen
DMA	Directiva marc de l'aigua
DQO	Demanda química d'oxigen
EC	<i>Evolutionary computation</i>
EDAR	Estació depuradora d'aigües residuals
EDAs	<i>Estimation of distribution algorithms</i>
EQO	Objectiu de qualitat ambiental
EQS	Estàndard de qualitat ambiental
GBS	<i>Graph-based Ant System</i>
GDP	Programació disjuntiva generalitzada
gP	Penalització global
Hc	Hipercub
IA	Intel·ligència artificial
LP	Programació lineal
MBS	<i>Model based search</i>
MES	Sòlids en suspensió
MM	Max-Min
NLP	Programació no lineal
NT	Nitrogen total
PSARU	Programa de sanejament d'aigües residuals urbanes
PSARI	Programa de sanejament d'aigües residuals industrials
PT	Fòsfor total
RLT	Tècnica de reformulació-linealització
SA	<i>Simulated annealing</i>
SARU	Sistema d'aigües residuals urbanes
SGA	<i>Stochastic gradient ascent</i>
SMA	Sistema multiagent



TS	<i>Tabu search</i>
TSP	Problema del viatjant de comerç

Abreviatures:

A. Domèstiques	Aigües domèstiques
Ag.	Agent
A. Receptora	Aigua receptora
Fig.	Figura
eq.	Equació
p.e.	Per exemple

## LLISTAT DE VARIABLES

- $a$  Importància relacionada amb el fet de tenir un volum total en el trajecte d'una formiga que excedeixi el volum d'aigües residuals industrials admissible a l'EDAR
- $a_r$  Importància d'obtenir valors de les càrregues contaminants en el trajecte d'una formiga que excedeixin els seus corresponents valors d'admissió a l'EDAR
- $b$  Importància relacionada amb el valor del quocient entre la solució obtinguda i la millor
- $C^r$  Concentracions dels contaminants  $x_r$ , en les aigües residuals industrials admissibles a l'EDAR
- $C_D^r$  Concentracions dels contaminants  $x_r$ , en les aigües residuals d'origen domèstic a aportar a l'EDAR
- $C_{D0}^r$  Concentracions dels contaminants  $x_r$ , en l'aigua del dipòsit de retenció d'aigües residuals d'origen domèstic a l'inici
- $C_e^r$  Concentracions dels contaminants  $x_r$ , en l'efluent de l'EDAR
- $C_i^r$  Concentracions dels contaminants  $x_r$ , en l'aigua residual de l'activitat industrial  $i$  que es proposa aportar a l'EDAR
- $C_{i0}^r$  Concentracions dels contaminants  $x_r$ , en l'aigua del dipòsit de retenció d'aigua residual de l'activitat industrial  $i$  a l'inici
- $C_{M0}^r$  Concentracions dels contaminants  $x_r$ , en l'aigua del dipòsit de retenció d'aigües d'escorrentia pluvial a l'inici
- $C_M^r$  Concentracions dels contaminants  $x_r$ , en les aigües plujanes a aportar a l'EDAR
- $C_{DM}^r$  Concentracions dels contaminants  $x_r$ , en les aigües plujanes a aportar directament a la massa d'aigua receptora
- $C_{MA}^r$  Concentracions dels contaminants  $x_r$ , en la massa d'aigua receptora
- $\bar{D}_i^r$  Mitjana de valors absoluts de les diferències entre els valors de  $C_i^r$  i les seves corresponents concentracions preestablertes  $\bar{X}_i^r$
- $Ind_i$  Conjunt d'activitats industrials amb  $i \in \{1, \dots, n\}$

$K_i$	Coefficient assignat a cada activitat industrial en relació al grau de saturació de la seva descàrrega
$L_D$	Volum d'aigües residuals d'origen domèstic que es proposa aportar a l'EDAR
$L_{D0}$	Volum inicial d'aigües residuals d'origen domèstic al corresponent dipòsit de retenció
$L_i$	Volum d'aigua residual de l'activitat industrial $i$ que es proposa aportar a l'EDAR
$L_{i0}$	Volum inicial d'aigua residual de l'activitat industrial $i$ al corresponent dipòsit de retenció
$L_{M0}$	Volum inicial d'aigües d'escorrentia pluvial al corresponent dipòsit de retenció
$L_M$	Volum d'aigües plujanes que es proposa aportar a l'EDAR
$Lo^r$	Càrregues de contaminants $x_r$ admissibles a l'EDAR
$Lo_m^r$	Càrregues de contaminants $x_r$ assolides en el trajecte de la formiga $m^{èsima}$
$p_{best}$	Probabilitat de construir la millor solució amb $\tau_{max}$
$p_{dec}$	Probabilitat que una formiga seleccioni una descàrrega d'aigua residual corresponent a una aresta amb $\tau_{max}$
$p_{ij}^m(t)$	Probabilitat que la formiga $m^{èsima}$ esculli el volum de descàrrega $V_i^j$ a la iteració $t$
$P^r$	Cost unitari de cada contaminant $x_r$
$Q$	Coefficient de la regla d'actualització de feromona
$T_i^r$	Coefficient punta de cada contaminant $x_r$ en l'activitat industrial $i$
$TV_m$	Volum total d'influent a l'EDAR assolit en el trajecte de la formiga $m^{èsima}$
$V$	Volum que es proposa admetre a l'EDAR d'aigües residuals industrials
$V_{DM}$	Volum d'aigües plujanes que es preveu aportar directament a la massa d'aigua receptora
$V_e$	Volum d'efluent de l'EDAR
$V_i$	Volum de descàrrega d'aigua residual de l'activitat industrial $i$ quan s'ha prioritzat
$V_i C_i^r$	Càrregues dels contaminants $x_r$ en l'aigua residual descarregada per la indústria $i$ quan s'ha prioritzat
$V_i^j$	Possibles descàrregues volumètriques de l'activitat industrial $i$
$V_{in}$	Volum de descàrrega d'aigua residual de l'activitat industrial $i$ quan no s'ha prioritzat
$V_{in} C_{in}^r$	Càrregues dels contaminants $x_r$ en la descàrrega d'aigua residual de l'activitat industrial $i$ quan no s'ha prioritzat

$V_T$	Volum d'influent total, incloent les aigües residuals d'origen domèstic, pluvial i industrial, que es proposa admetre a l'EDAR
$VC^r$	Càrregues dels contaminants $x_r$ que es proposa admetre a l'EDAR d'aigües residuals industrials
$V_T C_T^r$	Càrregues dels contaminants $x_r$ que es proposa admetre en l'influent total a l'EDAR
$V_{T0}$	Volum disponible inicialment a l'EDAR
$V_{T0} C_{T0}^r$	Càrregues dels contaminants $x_r$ admissibles inicialment a l'EDAR
$w^r$	Pes assignat a cada contaminant $x_r$
$x_r$	Conjunt de contaminants amb $(MES, DBO, DQO, NT, PT) = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$
$\bar{X}_i^r$	Concentracions mitjanes preestablertes dels contaminants $x_r$ per a cada activitat industrial
$y_i^j$	Variables de decisió binària
$Z$	Funció de cost global
$Z^*$	Millor solució obtinguda en una iteració
$Z^{**}$	Millor solució factible obtinguda de l'execució del primer algorisme de millora local
$Z_{ij}$	Conjunt de totes les solucions factibles construïdes per una població de $M$ formigues a l'algorisme $Hc$
$Z_m$	Solució obtinguda per la formiga $m^{èsima}$ en el seu recorregut
$Z_{max}$	Cost màxim assolit en 10 repeticions de l'algorisme
$\alpha$	Importància de la feromona
$\beta$	Importància de la informació heurística
$\eta_{ij}$	Informació heurística específica
$\nu$	Cost per unitat volumètrica de descàrrega d'aigua residual industrial
$\rho$	Coefficient per a l'evaporació de la feromona
$\sigma_{C^r}$	Desviacions estàndard dels valors de concentracions $C_i^r$ de les aigües residuals industrials

$\sigma_{D^r}$	Desviacions estàndard dels valors absoluts de les diferències $D_i^r$
$\sigma_L$	Desviació estàndard dels valors de volum d'aigua residual industrial $L_i$
$\sigma_{T^r}$	Desviacions estàndard dels valors dels coeficients punta $T_i^r$
$\sigma_Z$	Desviació estàndard dels valors de cost $Z$ obtinguts en 10 repeticions de l'algorisme
$\tau_{ij}(t)$	Rastre de feromona en la iteració $t$
$\tau_{\min}$	Valor mínim de feromona a l'algorisme $MM$
$\tau_{\max}$	Valor màxim de feromona a l'algorisme $MM$
$\Delta\tau_{ij}^{best}$	Feromona generada per la formiga que ha assolit la millor solució $Z^*$ a la iteració finalitzada emprant l'algorisme $MM$
$\Delta\tau_{ij}^m$	Quantitat de feromona addicionada per la formiga $m^{èsima}$ emprant l'algorisme $Hc$
$\psi$	Pes del cost de les càrregues contaminants

# Capítol 1

## Introducció

*“Our use of water in all aspects of our lives has a direct impact on the rivers and wetlands...We cannot expect our environment to provide a constantly increasing supply of water”*

Dr David King, Director of Water Management, Environment Agency UK (2006)

Les conques fluvials constitueixen sistemes socioecològics complexos, sotmesos a una dinàmica de la qual en resulta el seu estat i que es pot relacionar amb conceptes tals com adaptabilitat i transformabilitat,<sup>1</sup> davant els canvis que es produeixen als diferents nivells o escales en què s'organitza el sistema.

L'estat ecològic és un indicador de la qualitat de l'aigua a la conca. Per tal que aquesta sigui l'adequada<sup>2</sup> i evitar que canvis en les seves característiques de composició química causin transformacions que excedeixen la seva capacitat d'adaptació i alterin el seu bon estat, es necessita de l'establiment d'un sistema capaç de gestionar les aigües residuals que li són aportades. Aquesta tasca comporta tractar una elevada complexitat<sup>3</sup> ja que són aportacions que presenten gran variabilitat tant en volum com en composició, difícilment previsibles per la casuística de les dinàmiques dels elements que les generen.

Una anàlisi molt simplificada de l'organització d'una conca presenta dos nivells estructurals bàsics:

- el més elevat correspon a la conca considerada en conjunt. Els canvis que s'hi produeixen responen a la forma en què les variacions de cabal i composició provinents d'un tram o massa aigües amunt afecten les característiques del tram següent, i consecutivament a tota la conca;

- el més baix correspon a la massa d'aigua que defineix cada tram de conca. Les alteracions en la composició química de la seva aigua són el resultat de les variacions de l'efluent del sistema de sanejament i, si escau, dels abocaments d'aigües residuals no sanejades i/o de les aportacions directes i d'escorrentia d'esdeveniments meteorològics.

Focalitzant sobre l'estructura organitzativa d'una massa d'aigua receptora de les aigües sanejades, provinents d'un sistema d'aigües residuals urbanes (SARU) s'observen:

- un nivell organitzatiu elevat que està compost per la mateixa massa d'aigua receptora, el sistema de tractament de les aigües residuals i el sistema de recollida i transport. La qualitat de l'aigua que és aportada a l'aigua receptora és conseqüència de l'eficàcia del sistema de tractament, que per la seva part és dependent de les característiques volumètriques i de composició de les aportacions d'aigua residual que realitza el sistema de recollida i transport;

- un nivell organitzatiu baix que correspon als elements generadors de les aigües residuals que es descarreguen al sistema de clavegueram. Les seves aportacions comporten unes característiques de composició que varien en funció, entre d'altres, de la demografia, els usos domèstics de l'aigua, les activitats i usos industrials de l'aigua, els esdeveniments meteorològics, etc. Globalment les descàrregues provenen dels tres subsistemes d'aigües residuals: d'origen domèstic, d'escorrentia pluvial o d'esdeveniments meteorològics i d'activitats industrials (vegeu Fig. 1.1). Cada subsistema presenta la seva pròpia dinàmica de generació, sotmesa a diverses circumstàncies que fan que el flux global generat sigui variable en volum i composició.

En aquest nivell organitzatiu, sorgeix un factor clau per al sistema de gestió: l'assoliment d'una adequació del flux global a les característiques de composició requerides per garantir una eficàcia adequada del sistema de tractament. Aquesta tasca esdevé un problema complex quan

un percentatge elevat de l'influent total a l'estació depuradora d'aigües residuals (EDAR) correspon a aportacions d'aigües residuals industrials, ja que la seva elevada variabilitat pot comportar sobrecàrregues de volum i/o de càrregues contaminants al tractament, les quals cal evitar per no alterar-ne el funcionament, sobretot quan es disposa de tractament biològic.

Fins a l'actualitat, el control de l'influent de l'EDAR s'ha basat en la fixació de límits pels diferents tipus de fluxos d'entrada, establint-se l'assignació d'un límit superior a cada flux en funció de la capacitat del tractament, i del nombre i característiques dels efluents industrials. Tot i que aquest enfocament pot ésser útil per evitar les sobrecàrregues, no pot reflectir les eventualitats de les variacions que es produeixen en les diferents aportacions a l'EDAR, i, com a resultat, el procés de tractament no pot assolir una eficiència òptima.

Per al bon funcionament del SARU resulta interessant solucionar la combinació de les descàrregues cap a l'EDAR en un context que permeti reflectir la variabilitat de les característiques químiques i les interaccions que es produeixen entre el sistema de tractament i el sistema de recollida i transport, entre d'altres.<sup>4-11</sup>

En el decurs dels darrers anys, per resoldre problemes d'elevada complexitat<sup>3,4,12</sup> s'han desenvolupat tècniques basades en mètodes d'intel·ligència artificial (IA) que han permès el desenvolupament de models que poden actuar en entorns imprevisibles, amb un coneixement limitat i incert, i interactuant en temps real amb d'altres sistemes.<sup>13</sup> En aquest context, s'ha introduït el paradigma d'agents<sup>14-16</sup> i sistemes multiagent (SMA).<sup>17,18</sup> Els agents es consideren entitats (p.e. *softwares*) que perceben el seu entorn a través de sensors i són capaços d'actuar-hi.<sup>16</sup> Se'ls atribueix racionalitat quan realitzen la millor acció possible a partir de les dades percebudes.<sup>16</sup> El concepte de sistema multiagent sorgeix quan, a més a més, és necessari que diversos agents actuïn coordinadament per resoldre problemes d'ampli abast que sorgeixen de les interdependències entre les funcions i els paràmetres de funcionament dels agents i amb l'entorn, i s'han d'adoptar decisions que sobrepassen la capacitat de decisió i actuació individual de cada agent. Recentment l'aplicació del paradigma ha estat proposat per al desenvolupament de sistemes de gestió ambiental.<sup>19</sup>



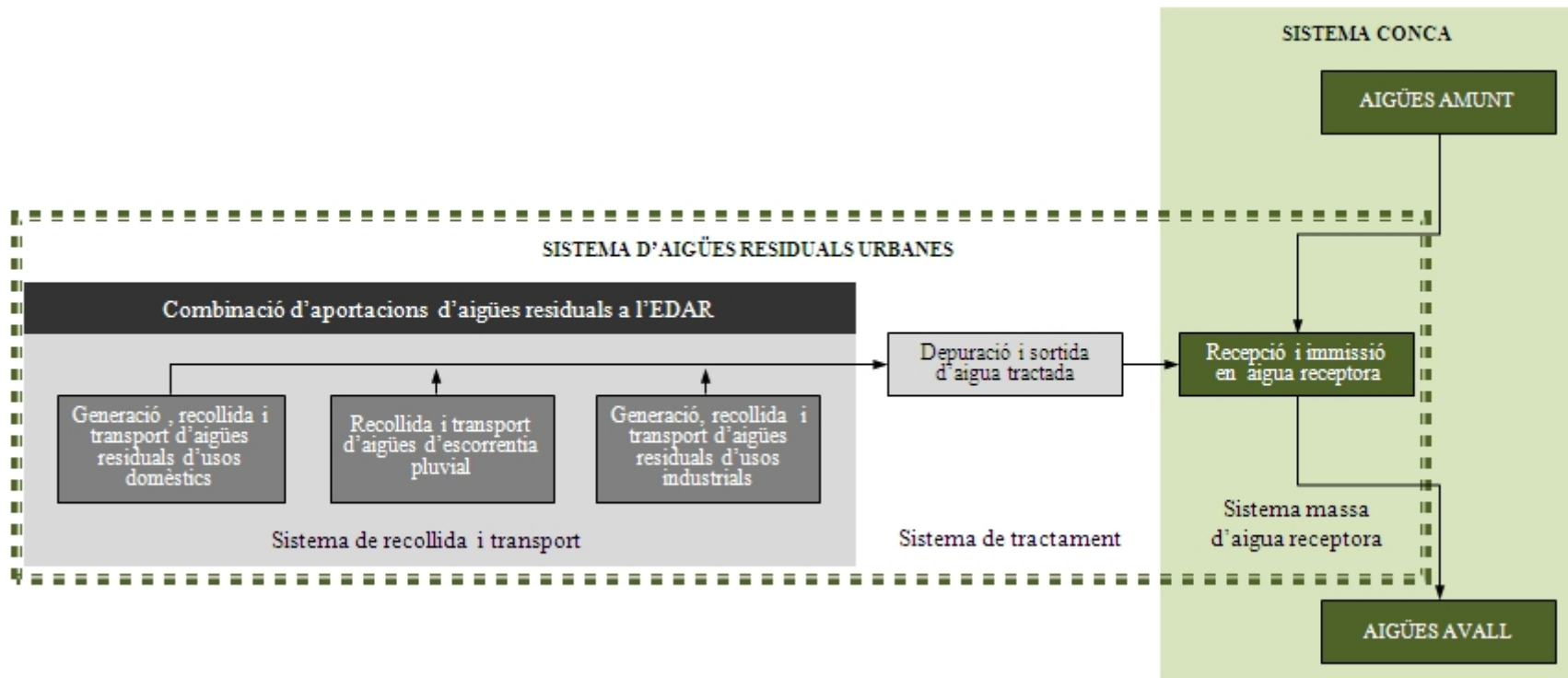


Fig. 1.1. Diagrama esquemàtic d'un sistema d'aigües residuals

## **Context, plantejament i hipòtesis de treball**

L'abast del present treball és un sistema d'aigües residuals urbanes constituït per un sistema de recollida i transport de les aigües residuals d'origen domèstic, pluvial (o d'escorriments superficials de fenòmens meteorològics en general) i industrial, un sistema de tractament de les aigües residuals amb eliminació biològica i una massa d'aigua receptora de l'aigua residual sanejada.

El sistema es presenta com una estructura organitzativa amb característiques de funcionament distribuïdes, heterogeneïtat dels components i interdependències entre els seus components i entre els diferents nivells de la seva estructura organitzativa, així com amb l'entorn; alhora, els components presenten tasques específiques a realitzar (per a les quals han estat dissenyats). El plantejament es basa en la consideració d'aquestes tasques com a modelitzacions intracomponent (encapsulades), però amb adequació dels valors dels paràmetres de funcionament, com a resultat de l'intercanvi de dades que es produeix en un context d'organització jerarquitzada i coordinada de funcions (Fig. 1.1) i presa de decisions, cosa que facilita l'assoliment dels objectius de funcionament global i els propis de cada tasca. El paradigma que es proposa per a aquest tipus de plantejament és el d'agents i sistemes multiagent, per la qual cosa sorgeix la primera hipòtesi de treball.

**Hipòtesi 1.** El paradigma d'agents i sistemes multiagent com a element capaç de gestionar les aigües residuals del sistema de sanejament.

La proposta de SMA es desenvolupa a nivell global del sistema de sanejament, sense tractar les modelitzacions internes específiques del tractament ni del clavegueram. Abasta el desenvolupament conceptual dels agents que componen el sistema i les seves comunicacions d'acord amb conceptes derivats, entre d'altres, de la metodologia Gaia,<sup>20,21</sup> que faciliten que es pugui tractar, de forma independent, la implementació del sistema en no establir requeriments específics d'anàlisi i disseny.

Adicionalment, i per tal de resoldre la problemàtica de la combinació de les aigües residuals generades, es planteja la instanciació d'un agent Coordinador. L'agent, que no coincideix amb cap component físic del SARU, es defineix (i s'implementa) per executar la funció bàsica d'assoliment d'un influent a l'EDAR amb unes característiques que siguin (o s'apropin) a les

màximes admissibles per l'EDAR, sense sobrepassar-les i afavorint la descàrrega dels efluent industrials amb una major urgència relativa. Les regles de decisió de l'agent Coordinador s'inicien amb dos possibles itineraris d'execució:

- si la capacitat de l'EDAR, en volum i en càrregues de contaminants, és suficient per admetre totes les propostes d'aportacions d'efluent industrials, les accepta totes, una vegada admeses les aportacions de residuals d'origen domèstic i, si escau, pluvial;

- si la capacitat de l'EDAR, ja sigui en volum i/o en càrregues de contaminants, és insuficient per admetre la totalitat de les propostes d'aportacions d'efluent industrials, prioritza entre els efluent industrials, un cop admeses les aportacions de residuals d'origen domèstic i, si escau, pluvial.

El procés de prioritziació es planteja com una optimització combinatòria dels efluent industrials amb múltiples restriccions derivades dels valors de capacitats disponibles, per a volum i càrregues de contaminants, de l'EDAR a cada cicle. Les característiques del procés presenten similituds a les del problema computacional de la *motxilla*, per la qual cosa es proposa la seva solució mitjançant l'ús de la metaheurística d'optimització de colònia de formigues<sup>22</sup> (ACO). Així doncs, s'estableix una segona hipòtesi de treball.

**Hipòtesi 2.** La capacitat d'un mètode basat en una optimització de colònia de formigues per a la gestió de les aportacions d'aigües residuals industrials a l'EDAR.<sup>23</sup>

Es proposen, com a instanciacions del mètode, quatre versions algorísmiques ACO que s'han anomenat *sP*, *gP*, *MM* i *Hc*. Les dues primeres, *sP* i *gP*,<sup>23</sup> deriven de l'algorisme original *Ant System* (AS); les dues darreres, *MM* i *Hc*, s'adapten dels algorismes *Max – Min Ant System*<sup>24</sup> i *Hypercube*<sup>25</sup> definits per solucionar el problema computacional d'optimització combinatòria del *viatjant de comerç*, el qual presenta un plantejament diferent al problema objecte d'estudi. Totes les versions que es proposen basen la construcció de la solució, en una cerca probabilística i iterativa realitzada per formigues virtuals (entitats computacionals simples), les quals utilitzen el rastre de feromona i, addicionalment, la informació heurística, que es defineix específicament, per guiar la seva cerca de solució. Aquesta fase es complementa, en tots els casos, amb dos mètodes heurístics de millora local de la solució construïda.

La diferència bàsica entre les quatre propostes algorísmiques està en el model d'actualització del rastre de feromona, emprant penalitzacions o límits. Les versions *sP* i *gP* utilitzen diferents penalitzacions com a forma d'addicionar feromona quan s'assoleix una solució que no compleix totes les restriccions. La primera, utilitzant una penalització simple sobre els volums que genera valors minsos de feromona quan el volum total de la solució construïda excedeix el volum admissible a l'EDAR. La segona, utilitzant una penalització global amb múltiples factors sobre el volum i les càrregues de contaminants que genera valors minsos de feromona quan el volum total o alguna o diverses càrregues de contaminants de la solució construïda excedeixen els corresponents valors admissibles a l'EDAR. Les versions *MM* i *Hc* utilitzen límits en els rastres de feromona. La primera, limita els cúmuls a valors dins un interval amb un màxim i un mínim que s'estableixen a cada iteració. La segona, estableix els valors dins l'interval  $[0,1]$  per a totes les iteracions.

### **Aportació que suposa la tesi**

La tesi aporta el desenvolupament conceptual d'un sistema multiagent per a la gestió d'un sistema de sanejament a partir de l'abstracció de la seva estructura organitzativa, les funcions que s'hi executen i les interrelacions que s'hi estableixen i que afecten la composició química de l'aigua residual. S'incorporen al sistema de gestió els conceptes de dinàmica a temps real i interrelacions.

La proposta fa una aportació d'enfocament de gestió integrada, tal i com assenyala la Directiva Marc de l'Aigua,<sup>2</sup> però permet alhora poder incorporar un enfocament cap a les funcions pròpies de cada component. Els agents es mostren amb possibilitats d'ésser dotats amb regles de decisió i inclouen un o diversos mètodes, deterministes o estocàstics per resoldre, amb eficàcia, les funcions específiques assignades. En aquest context, es descriu detalladament i s'implementa la proposta d'un agent Coordinador per resoldre les aportacions d'aigües residuals a l'EDAR. L'agent inclou un procediment d'optimització combinatòria que s'executa en la corresponent instanciació algorísmica i que en si mateix constitueix un altre SMA, que està format per una colònia de formigues virtuals (agents) que cooperen a través del rastre de feromona per assolir una solució òptima que compleixi totes les restriccions. Fins on ha estat possible verificar, aquest estudi constitueix la primera proposta d'aplicació d'algorismes ACO a la gestió d'aigües residuals industrials.

S'aporta l'avaluació de l'execució de la prioritització dels efluent industrials, quan el sistema de tractament no té capacitat suficient per admetre totes les propostes d'aportacions, amb algorismes ACO. Es descriuen i instancien quatre propostes algorísmiques: *sP*, *gP*, *MM* i *Hc*. Per a cadascuna, s'aporten els valors calibrats dels paràmetres algorísmics específics i, amb l'execució dels algorismes calibrats sobre diferents tipus d'escenaris, s'obtenen solucions que permeten descriure el tipus de comportament de descàrregues que cal esperar i el seu cost.

### **Estructura del document**

El document s'estructura de la forma següent: primer, es planteja l'objecte de la recerca, a través d'una descripció dels antecedents de sistemes de gestió integrada de les aigües residuals urbanes, l'anàlisi de les característiques de funcionament i la problemàtica que es pot generar en la gestió dels efluent industrials.

A continuació, al primer apartat del capítol 3, s'introdueixen el paradigma d'agents i sistemes multiagent, les seves característiques i metodologies de desenvolupament. Es descriu el cas d'estudi, se selecciona el procés de desenvolupament de l'aplicació del paradigma i es defineixen funcionalitats, models, estructura organitzativa i diagrama de funcionament global. Al segon apartat, es defineixen els procediments de l'agent Coordinador i dels algorismes ACO proposats per solucionar la prioritització dels efluent industrials.

Al capítol 4 es presenten els resultats i la discussió amb dues parts diferenciades: la primera, relacionada amb les execucions dels algorismes ACO i, la segona, amb la implementació de l'agent Coordinador en el context multiagent, la qual correspon a la simulació successiva de cicles del sistema per tal de verificar l'execució de l'agent. En primer lloc, es defineixen els escenaris (complementats amb les dades de l'Annex I) de simulació, el procés de calibratge dels paràmetres algorísmics i els resultats obtinguts de l'execució de les simulacions (complementats amb les dades de l'Apèndix). En segon lloc, es presenta el procediment d'execució de l'agent Coordinador, definint els escenaris de simulació del funcionament del sistema de sanejament (complementats amb les dades de l'Annex II) i els resultats obtinguts.

Finalment, es presenten les conclusions de les dues hipòtesis de treball i la proposta de treball futur.

## Capítol 2

# Plantejament de l'objecte de la recerca

### 2.1. Gestió integrada del sistema d'aigües residuals urbanes

La gestió integrada del sistema d'aigües residuals presenta una de les primeres referències en el concepte proposat per Beck<sup>26</sup> l'any 1976, anomenat Sistema de Qualitat de l'Aigua. No obstant això, la consideració integral del sistema no va adquirir una certa rellevància fins a la dècada dels 90 i es va incrementar de forma molt notòria a partir de principis dels 2000.

#### *Antecedents. Breu descripció*

Lijklema,<sup>27</sup> l'any 1993 va presentar la necessitat de no tractar de forma isolada els sistemes de clavegueram, les plantes de tractament de l'aigua residual i les aigües receptors. Posteriorment Vanrolleghem,<sup>28</sup> Rauch<sup>29</sup> i Butler<sup>9</sup> van tractar la integració del sistema focalitzant cap a objectius en les aigües receptors. Vanrolleghem<sup>28</sup> va presentar una avaluació del disseny dels sistemes de clavegueram i tractament, mitjançant la relació entre l'objectiu de qualitat ambiental i l'estàndard de qualitat ambiental (terme EQO/EQS), descrivint problemes en el trasllat dels objectius ambientals a les característiques operacionals d'immissió. Rauch<sup>29</sup> va proposar la simplificació de l'estructura del model integrat focalitzant sobre un tipus rellevant d'impacte de la descàrrega d'aigua residual en les aigües receptors. L'autor va descriure dificultats en la combinació de models del comportament dinàmic dels sistemes de clavegueram, tractament i

aigües receptores i proposa evitar els problemes de compatibilitat entre models d'acord amb: la determinació de l'impacte rellevant per a les aigües receptores, la identificació del conjunt mínim de variables d'estat i de processos necessaris per descriure adequadament l'impacte, i l'especificació de les entrades i transformacions a les interfícies del model. Butler<sup>9</sup> va enfocar l'estudi del sistema integrat considerant criteris de rendiment a través d'una eina de simulació que engloba models de simulació dels components. Així mateix, al treball de Schmitt<sup>7</sup> s'avalua la permissivitat d'excloure components o negligir interaccions i es remarca la complexitat del sistema, la seva heterogeneïtat i els problemes per assolir una harmonització de les interfícies dels diferents models. D'altra banda, l'estudi elaborat per Seggelke<sup>30</sup> indica la possible reducció dels impactes globals a les aigües receptores mitjançant el control de l'influent del sistema de tractament.

Meirlaen<sup>31</sup> proposa l'ús de models de substitució per reduir la complexitat que es manifesta en la modelització del sistema integrat a través de models mecànics i conclou considerant la seva major velocitat i la menor però suficient precisió. Un treball posterior del mateix autor<sup>11</sup> proposa el control en temps real com a opció vàlida per a la minimització de l'impacte en les aigües receptores, en la mateixa línia que conclou Schütze<sup>32</sup> en el seu treball de revisió. Erbe<sup>33</sup> presenta la necessitat de simulació numèrica simultània de les descàrregues de la xarxa de clavegueram i el tractament, per a interaccions importants. En estudis posteriors<sup>10,34</sup> proposa l'anàlisi dels fluxos a través de tot el sistema, per tal de poder gestionar en funció de les variables d'estat del tractament o de les aigües receptores. També Benedetti<sup>35</sup> tracta de la identificació dels fluxos de contaminació i diferencia segons l'abast del sistema.

L'any 2009, Muschalla<sup>36</sup> suggereix una guia per al modelatge integrat del sistema d'aigües residuals urbanes basada en sis etapes. El procediment s'inicia amb l'anàlisi del sistema, a continuació es defineixen els objectius i els criteris que cal considerar, l'enfocament del model, l'anàlisi del model i de les dades disponibles, el calibratge i validació, finalment, aplica el model a escenaris diferents.

### *Polítiques de gestió de les aigües residuals*

Els canvis legislatius als països europeus, conseqüència de l'adopció de polítiques de gestió de l'aigua comunes enfocades a l'assoliment, preservació i manteniment del bon estat de les aigües, han estat un element decisiu per a l'enfocament del sistema d'aigües residuals urbanes de forma integrada.

A principis de la dècada dels 90, es va aprovar la Directiva 91/271<sup>37</sup> del Consell Europeu sobre el tractament de les aigües residuals urbanes, segons la qual s'establia com a forma de protegir al medi ambient dels efectes negatius dels abocaments d'aigües residuals, els límits que han de complir els abocaments de les instal·lacions de tractament en aigües receptores, per la qual cosa es consideraren:

- *aigües residuals urbanes* a les aigües domèstiques o la barreja d'aquestes amb aigües residuals industrials i/o aigües d'escorrentia pluvial,
- *aigües residuals domèstiques* a les aigües residuals provinents de zones d'habitatges i de serveis i generades principalment pel metabolisme humà i les activitats domèstiques,
- *aigües residuals industrials* a totes les aigües abocades des de locals utilitzats per efectuar qualsevol activitat comercial o industrial, que no siguin aigües residuals domèstiques ni aigües d'escorrentia pluvial.

La Directiva estableix la possibilitat que es produeixin pluges torrencials inusuals, per les quals els sistemes de col·lectors i de tractament no tinguin capacitat suficient. En aquestes circumstàncies, admet la flexibilitat dels límits i deixa als Estats membres la capacitat de decidir les mesures a adoptar, entre les quals cita l'especificació d'un nombre que es consideri acceptable de desbordaments a l'any.

Posteriorment, l'any 1996 es va aprovar la Directiva 96/61<sup>38</sup> relativa a la prevenció i al control integrats de la contaminació, segons la qual es parteix d'un enfocament cap a la prevenció, la reducció i en la mesura del possible, l'eliminació de la contaminació, per tal de garantir una gestió adequada dels recursos naturals d'acord amb el principi "qui contamina, paga". La Directiva s'adreça a activitats industrials catalogades com a instal·lacions de combustió,



producció i transformació de metalls, indústries minerals, indústria química, i altres activitats, entre les quals hi ha els escorxadors. Per a totes, es defineix un llistat indicatiu de les principals substàncies contaminants a considerar en fixar els límits d'emissió. Es preveu que els valors límit s'aplicaran en el punt en què les emissions surten de la instal·lació.

A finals del 2000, el Parlament europeu i el Consell van aprovar la Directiva Marc de l'Aigua,<sup>2</sup> (DMA) en la que es va establir un marc comú d'actuació per a tots els països membres en matèria de gestió de l'aigua. L'aigua va passar a ésser considerada no solament un recurs, sinó també un bé públic que cal protegir i conservar. La Directiva es basa, entre d'altres, en els següents principis:

- el no-deteriorament i assoliment del bon estat integral de les masses d'aigua superficials (i subterrànies),
- l'enfocament combinat de la contaminació i gestió integrada del recurs.

La DMA considera el bon estat de les aigües superficials com a l'estat assolit per una massa d'aigua superficial quan tant el seu estat ecològic com el seu estat químic són, almenys, bons, tenint en compte el marc de cada conca hidrogràfica. En l'annex VI, cita el llistat de mesures que han d'estar incloses en els programes dels estats membres, incloent els requeriments de les Directives 91/271/CEE i 96/61/CE.

L'aplicació de la DMA en l'àmbit català, va determinar la revisió i actualització dels plans hidrològics de conca vigents<sup>39</sup> per derivar cap el Pla de gestió del districte de conca fluvial de Catalunya, amb l'objectiu l'assolir un bon estat de les masses d'aigua abans del 22 de desembre de 2015. A través del Decret 3/2003<sup>40</sup> es van introduir per a les conques internes de Catalunya, els mateixos instruments de planejament que els establerts en la DMA, basant la planificació en el concepte de conca hidrogràfica. Posteriorment, es va regular el procediment d'elaboració i aprovació dels diferents plans i programes a través del Reglament de planificació hidrològica establert pel Decret 380/2006.<sup>41</sup> L'any 2010 es va aprovar el Programa de mesures del Pla de gestió del districte de conca fluvial de Catalunya,<sup>42</sup> en què s'establiren quatre grans àmbits, que incloïen les mesures adreçades a la millora de la qualitat de les aigües. En aquest context, es tenen en compte, entre d'altres, les adreçades a la millora del sanejament de les aigües residuals urbanes. Les actuacions es van iniciar amb el Programa de sanejament d'aigües residuals urbanes 2005<sup>43</sup> (PSARU 2005) i amb el Programa de sanejament de les aigües residuals

industrials<sup>44</sup> (PSARI 2003) que es va establir amb l'objectiu de permetre una connexió adequada dels abocaments industrials al sistema d'aigües residuals urbanes. Entre les mesures proposades al Programa destaca, entre d'altres, un pla d'acció de reordenació d'abocaments que té per objectiu intervenir administrativament en aquells abocaments industrials que estan connectats a sistemes públics de sanejament i que condicionen el rendiment dels sistemes de tractament d'aigües residuals i la qualitat de l'efluent tractat. El pla emfasitza la importància d'eliminar els incompliments dels límits d'abocament dels efluents industrials, per la qual cosa proposa entre d'altres, la reducció dels límits d'abocaments industrials al sistema públic de sanejament i la desconexió d'abocaments industrials.

## **2.2. Característiques de funcionament**

El sistema d'aigües residuals urbanes constitueix un sistema dinàmic del qual s'observen les característiques següents:

- els components es dissenyen en funció de les finalitats o objectius individuals a assolir, cosa que implica que són heterogenis entre ells,
- es presenten objectius de grups de components diferents dels objectius específics dels components individuals,
- es pot definir una estructura jerarquizada de funcions a executar per assolir objectius, en el sentit que és possible establir successius subsistemes constituïts per successius nivells de grups de components i finalment de components (vegeu Fig. 2.1),
- el funcionament d'un component, exceptuant els elements generadors d'aigua residual, depèn del funcionament d'altres components, de manera que s'evidencia l'existència d'interaccions,
- es presenten i diferencien les interaccions entre els subsistemes, de les interaccions entre components dels subsistemes. No obstant això, també es presenten interaccions que no són independents entre elles,

- el funcionament global del sistema depèn de les interaccions i dels funcionaments individuals dels components.

Aquestes particularitats comporten que la gestió del sistema constitueixi una problemàtica sotmesa a un elevat grau de complexitat.<sup>3,4</sup>

Les referències bibliogràfiques i la pràctica demostren àmpliament que l'ús de la modelització matemàtica ha esdevingut i esdevé un eina molt eficaç per gestionar els components de forma individual<sup>3</sup>, però la modelització del sistema integrat<sup>7-11</sup> presenta limitacions pel temps de càlcul necessari i especialment per la dificultat en establir interaccions entre els components i amb l'entorn. Devesa<sup>5</sup> cita com a problemes habituals la comunicació de dades, l'adaptació de les variables d'estat de cada subsistema i les incerteses.

Diferents autors, entre els quals Poch,<sup>4</sup> Cortés,<sup>45</sup> Comas,<sup>3</sup> Makropoulos<sup>46</sup> i Benedetti,<sup>47</sup> proposen l'ús de diversos sistemes d'ajut a la decisió per tractar les problemàtiques d'elevada complexitat en entorns ambientals. Tot i la seva diversitat es podria considerar que comparteixen un paradigma comú. Per altra part, Wooldridge<sup>14</sup> suggereix gestionar els problemes d'elevada complexitat emprant el paradigma d'agents. L'autor considera el paradigma com a un sistema de presa de decisió que és autònom i pot captar i actuar en un determinat entorn, en un temps determinat. Per l'autor, les principals diferències del paradigma respecte als sistemes experts<sup>14, 48</sup> són que els agents poden interactuar directament amb l'entorn, captar la informació directament mitjançant sensors i són capaços de comunicar-se. Jennings<sup>15</sup> també coincideix en proposar un enfocament orientat a agents com a forma de facilitar el disseny i construcció de sistemes de *software* per a gestionar una elevada complexitat. Defineix el paradigma com un eina fàcilment adaptable a l'ús de mecanismes tals com:

- descomposició, en permetre desglossar el sistema global en parts més reduïdes, que finalment poden ésser conceptualitzades com a agents. Per Jennings,<sup>49</sup> els subsistemes corresponen a les organitzacions d'agents,

- abstracció, en emfasitzar en models simplificats els aspectes més importants de la problemàtica, tals com els components (agents), les interaccions i l'estructura organitzativa de les relacions,

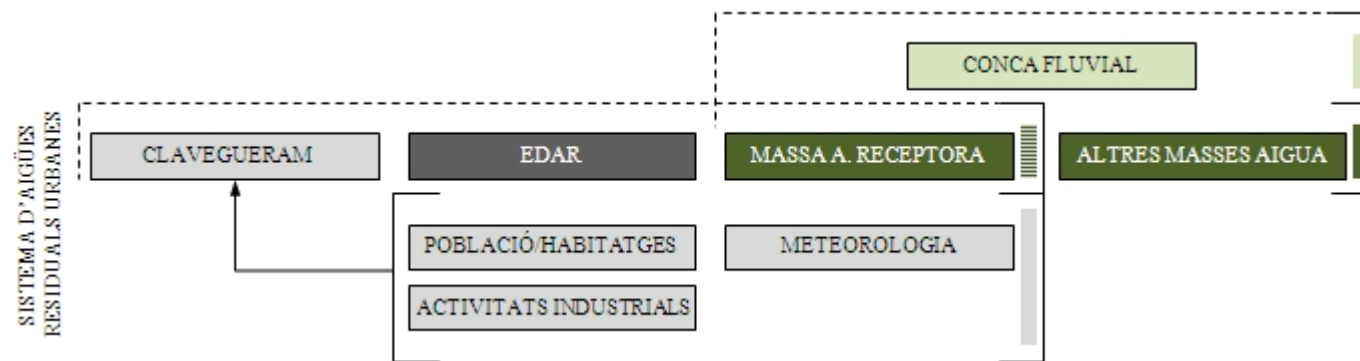


Fig. 2.1. Estructuració del sistema d'aigües residuals urbanes

- organització, en constituir l'estructura de les interaccions entre els diferents components i grups de components una forma d'identificació de com s'han de compondre els diferents subsistemes i com s'han d'establir relacions comunicatives per assolir una determinada funcionalitat.

Per al context objecte d'estudi, aquests mecanismes han de permetre establir una certa dependència entre la noció de subsistema i l'organització dels agents, així com idoneïtat en l'abstracció dels components del sistema com a agents.<sup>15</sup> L'ús de l'enfocament orientat a agents va ésser proposat per primera vegada en la publicació editada per Cortés i Poch.<sup>19</sup>

La solució de moltes problemàtiques complexes d'aplicació real, tal i com és la del sistema de sanejament, per Sycara,<sup>17</sup> necessita d'una conceptualització com a organització de diversos agents interactuant, per tal d'assolir no únicament els objectius individuals dels components sinó també els objectius dels subsistemes i els globals que sobrepassen la capacitat computacional individual d'un agent (amb informació limitada). Els objectius comuns de diversos agents (o la totalitat) es tracten a través de l'adequació de les seves interaccions (els agents poden actuar de forma coordinada, cooperativa o negociadora<sup>49,50</sup>), de forma que el comportament global es deriva de les interaccions.<sup>51,52</sup>

### **2.3. Els efluents industrials. Problemàtica**

La gestió de les entrades d'aigües residuals a l'EDAR constitueix un punt clau<sup>30</sup> per obtenir una qualitat adequada en el funcionament del sistema de tractament, adquirint especial importància en els sistemes que tracten aigua residual amb un elevat percentatge d'influent industrial degut a la seva casuística i elevada variabilitat en qualitat i quantitat.

En els sistemes que utilitzen tractament biològic és necessari suavitzar les fluctuacions, de cabal i càrregues contaminants, per tal de protegir la comunitat microbiana que tracta els contaminants. Així mateix, cal evitar les sobrecàrregues d'efluents industrials que poden alterar l'eficàcia del tractament.<sup>53-55</sup>

El procediment més habitualment emprat, que s'ha basat en l'establiment de límits pels diferents tipus de fluxos, pot resultar efectiu per evitar sobrecàrregues, però no ho és per tractar amb les variacions dinàmiques que es produeixen entre els diferents influents que arriben a l'EDAR. Com a resultat, el procés no pot garantir unes condicions d'eficàcia òptima en el tractament, per garantir-les, cal tenir en compte que el global de les diferents aportacions de característiques diverses ha de poder igualar o apropar-se el màxim a la capacitat disponible de l'EDAR. A més, s'han de poder tractar els efluents industrials en funció de la seva urgència relativa.

La bibliografia mostra diferents mètodes per gestionar efluents industrials amb un enfocament de final de línia, adreçant els efluents cap una xarxa de sistemes de tractament, amb l'objectiu de relacionar corrents industrials amb tractaments a un cost mínim. Inicialment Wang i Smith<sup>56</sup> van definir un sistema distribuït de tractaments d'efluents i Kuo i Smith<sup>57</sup> van introduir múltiples contaminants. Galan i Grossmann<sup>58</sup> van desenvolupar un model de programació no-lineal (NLP) i programació mixta-sencera no lineal per identificar les connexions entre les tecnologies de tractament i les seves corresponents ràtios de cabal i composicions per descarregar l'aigua residual al mínim cost acomplint les regulacions de composició. El seu procediment soluciona un model de programació lineal relaxada (LP) que s'utilitza com a punt de partida del model NLP. Lee i Grossmann<sup>59</sup> van aplicar un algorisme d'optimització global considerant una tècnica de programació disjuntiva generalitzada no convexa (GDP) i utilitzant principis basats en una tècnica de reformulació-linealització (RLT) per trobar el cost mínim. Per la seva banda, Meyer i Floudas<sup>60</sup> van aplicar una nova formulació lineal a trams per trobar un òptim global. D'altra banda, Karuppiah i Grossmann<sup>61</sup> van desenvolupar un algorisme *branch and contract* emprant GDP per resoldre la selecció de les tecnologies de tractament.

El nou enfocament que es proposa és l'adaptació d'un mètode de resolució de la prioritització dels efluents industrials quan l'EDAR no disposa de la suficient capacitat disponible en volum i/o càrregues de contaminants per admetre totes les propostes d'abocaments industrials. La resolució es focalitza cap a l'obtenció d'un influent de l'EDAR amb les característiques adequades als requisits del tractament en temps real. Les principals diferències respecte a anteriors propostes, entre les quals les basades en mètodes deterministes, són:

- la consideració d'un únic sistema de tractament com a destí de les aigües residuals,

- la utilització de les característiques de volum i composició de les diferents aigües residuals industrials a aportar a l'EDAR i de volum i característiques de composició admissibles pel tractament, com a paràmetres de base del plantejament del procés de prioritització dels efluents industrials,

- la consideració del procés en un marc d'aplicació del paradigma d'agents i sistemes multiagent, en el qual de la solució del procés s'obtenen les dades necessàries per a l'assoliment dels objectius del sistema de recollida i transport vinculats al sistema de tractament. El procediment constitueix una funció del SMA que és clau per facilitar l'assoliment dels objectius globals del sanejament.

## Capítol 3

# Metodologia

La metodologia seguida per assolir els objectius de la recerca es desglossa en dos apartats diferenciats. Al primer (Punts 3.1 i 3.2), s'aplica un procediment en cascada per la conceptualització d'un cas d'estudi del sistema d'aigües residuals urbanes a través del paradigma d'agents i sistemes multiagent, en el qual s'especifiquen els agents components del sistema, l'estructuració i les comunicacions. Al segon (Punt 3.3), es defineix a nivell intracomponent un dels agents del sistema (l'agent Coordinador). Es descriuen les regles amb les quals es desenvolupa la coordinació de les aportacions a l'EDAR i el procediment de resolució de la prioritització dels efluentis industrials, quan l'EDAR no té disponible suficient capacitat per admetre totes les aigües residuals. Per aquest procés, es proposa l'ús d'una metaheurística de colònia de formigues. Es proposen quatre versions algorísmiques d'optimització combinatòria com a diferents instanciacions cadascuna de les quals constitueix, en si mateixa, un nou sistema multiagent.

### **3.1. Paradigma d'agents i sistemes multiagent**

El paradigma d'agents i sistemes multiagent constitueix<sup>14</sup> una forma de conceptualitzar i implementar sistemes computacionals per resoldre problemes complexos de característiques distribuïdes. Dins d'aquest tipus de problemàtiques es pot incloure la gestió del sistema d'aigües residuals urbanes, l'abstracció de la qual, com a sistema multiagent, ha de permetre considerar



no únicament els components del sistema, sinó també les interaccions que s'hi produeixen i que comporten un determinat comportament global.

### *Agents. Definició i característiques*

El concepte d'agent dins l'àmbit de la intel·ligència artificial i les ciències computacionals es considera a partir de perspectives diferents, entre les quals, la definició de Wooldridge<sup>14</sup> és àmpliament acceptada.

Per Wooldridge,<sup>14</sup> un agent és un sistema computacional encapsulat que està situat en un determinat entorn en el qual és capaç d'actuar de forma flexible i autònoma per tal d'assolir els seus objectius de disseny. L'autor<sup>62</sup> considera que aquests sistemes de *software* (o *hardware*) estan dotats de:

- autonomia, per operar sense la intervenció directa de persones o altres, encapsulant un estat que no és accessible per a altres agents i prenent decisions sobre el que han de fer basant-se en aquest estat;<sup>14</sup>
- reactivitat, per respondre als canvis que es produeixen al seu entorn (que pot ésser un sistema físic, internet, un usuari a través d'una interfície gràfica, etc.), i que pot percebre;
- proactivitat, en ser capaços, de prendre la iniciativa i presentar un comportament dirigit a objectius;
- sociabilitat, per interaccionar amb altres agents (i possiblement persones) per mitjà d'algun tipus de llenguatge de comunicació.

Adicionalment l'autor<sup>14</sup> considera que estan dotats d'una certa intel·ligència quan són capaços de prendre una decisió correcta, en un temps adequat, de la pròxima acció a realitzar sobre l'entorn.

### *Classificació*

Nwana<sup>13</sup> estableix diferents tipologies bàsiques d'agents, basant-se en diversos enfocaments tals com són la mobilitat (diferenciant entre agents estàtics i mòbils), o el tipus de model intern (agents reactius i deliberatius). En aquesta darrera diferenciació considera agents:

- reactius als que no inclouen un model simbòlic del seu entorn, i actuen utilitzant un tipus de comportament estímulo/resposta per donar resposta als canvis de l'entorn;
- deliberatius als que sí contenen un model simbòlic i un model de raonament que els permet tenir interaccions de planificació i negociació amb d'altres agents.

Russell i Norvig<sup>16</sup> diferencien els agents pel seu grau de racionalitat. Es basen en el nivell d'informació disponible i la forma de prendre decisions. La seva classificació abasta des dels agents de reflex simple fins als agents basats en objectius o en utilitats (a més dels objectius consideren la mesura en què un estat de l'entorn és més satisfactori que un altre).

### *Comportament*

Mataric<sup>51</sup> defineix el comportament d'un agent, d'acord amb els procediments de què disposa, com la regularitat en la seva dinàmica d'interacció amb l'entorn.

### ***Sistemes multiagent (SMA). Definició i característiques***

Per a problemàtiques en les quals un únic agent no sigui capaç d'abastar tot l'àmbit objecte d'estudi, és possible definir un conjunt d'agents que treballin en comú per resoldre el problema global.<sup>48</sup> Els agents d'aquest conjunt o sistema multiagent són autònoms (assoleixen els seus propis objectius d'acord amb els propis recursos), generalment heterogenis i potencialment independents i en conjunt capaços d'obtenir solucions en situacions on l'expertesa està distribuïda, utilitzant fonts d'informació distribuïdes espacialment.<sup>17</sup>

### *Comportament.*

Per Mataric,<sup>51</sup> el comportament d'un conjunt d'agents es pot definir a través del patró temporal d'interaccions. Considera la comunicació com la forma més habitual d'interacció entre els agents. Distingeix dos tipus de comunicació: la directa i la indirecta. La primera es produeix quan la finalitat de la interacció és la transmissió d'informació (dades concretes) a un o diversos receptors. La segona es basa en el comportament observat d'altres agents (p.e. en actuacions de modificació de l'entorn, tal i com succeeix amb la deposició de feromona dels algorismes de colònia de formigues ).

Per Sycara,<sup>17</sup> el tipus de comportament es pot relacionar amb els tipus d'agents que constitueixen el sistema. En sistemes d'agents reactius, descriu un comportament global que es deriva de les simples interaccions entre agents, els quals només disposen d'informació a nivell local, però per als quals és possible completar funcions de conjunt malgrat que un dels agents presenti una errada. En sistemes d'agents deliberatius, defineix un tipus de comportament cohesionat, producte de la capacitat de cada agent per raonar sobre els efectes no locals que poden causar les seves accions, cosa que permet que es puguin solucionar possibles conflictes i interaccions perjudicials. En sistemes híbrids, és a dir que no presenten una estructuració amb la totalitat dels agents reactius, ni tampoc deliberatius, en què es combinen aspectes d'ambdós, descriu el comportament global com a dependent de la forma en què es produeixen les interaccions entre els nivells d'abstracció en què proposa que s'organitzi el sistema.

Per Barbuceanu,<sup>63</sup> en un sistema de diferents agents, cadascun amb els seus propis objectius individuals i capacitats de funcionament, les actuacions realitzades per un dels agents limiten i estan limitades per les actuacions dels altres agents. Per gestionar els seus límits d'actuació i assolir els objectius, l'autor proposa l'establiment d'algun tipus de tasca de coordinació.

### ***Procés de conceptualització***

Per definir el SMA que ha de constituir l'abstracció del sistema d'aigües residuals urbanes, s'han considerat dos nivells d'abstracció:<sup>64</sup>

- un punt de vista extern (com a sistema) per la conceptualització global del SARU,

- un punt de vista intern (és a dir, de composició de procediments o mètodes interns necessaris per a l'assoliment d'objectius individuals) respecte a cada agent.

L'objectiu de l'abstracció del sistema d'aigües residuals urbanes s'ha ubicat al nivell del punt de vista extern, per definir, a continuació, els procediments interns d'un dels agents del sistema (l'agent Coordinador) el qual desenvolupa tasques clau per al bon funcionament global.

### *Metodologies de desenvolupament de software*

La bibliografia presenta diferents metodologies per al desenvolupament de *software* basat en agents. Entre d'altres, n'hi ha algunes abastament referenciades com Gaia,<sup>20,21</sup> MaSE,<sup>65,66</sup> Tropos<sup>67</sup> i Prometheus.<sup>68</sup>

La metodologia Gaia, en la versió original<sup>20</sup> i en l'ampliada (Gaia 2),<sup>21</sup> distingeix una fase d'anàlisi que treballa amb conceptes abstractes del problema, i una de disseny en què es concreten les abstraccions. No explicita ni la col·lecció de requeriments del sistema, ni la forma d'implementació. Per Sturm,<sup>69,70</sup> és aplicable quan existeixen un objectiu global, entorns heterogenis i una estructura organitzativa estàtica. Presenta l'inconvenient de no considerar una estructura jerarquizada de rols i la dificultat per tractar amb diferents nivells d'abstracció del sistema, aspectes que s'intenten resoldre en l'adaptació de Gaia aplicable a entorns oberts (Roadmap<sup>71</sup>).

MaSE es mostra com una metodologia adequada per a agents heterogenis i àmbits diversos. Es basa en tres fases: captura d'objectius, aplicació de casos d'ús i refinat de rols. És aplicable a diverses tipologies d'agents en àmbits diferents.<sup>69</sup> Disposa d'un entorn, anomenat *agentTool*, de suport al seu desenvolupament. Presenta certes limitacions com la necessitat d'encapsular totes les interfícies externes en un agent, que participa en els protocols de comunicació del sistema, i que totes les converses han d'ésser entre dos.<sup>66</sup> De la mateixa manera que les versions original i 2 de Gaia, no considera una estructura jerarquizada de rols ni diferents nivells d'abstracció.<sup>69</sup>

Tropos és una metodologia desenvolupada per crear sistemes d'agents intel·ligents capaços d'actuar en entorns oberts.<sup>67</sup> Es basa en la creació d'un model del sistema a ser i del seu entorn, que és perfeccionat i ampliat de forma incremental. Es desenvolupa en cinc fases: primers

requeriments, requeriments finals, arquitectura, disseny detallat i implementació. Cernuzzi<sup>72</sup> descriu la metodologia com adequada per a sistemes amb requeriments difícils d'identificar o inestables. Segons Sturm<sup>69</sup> té l'inconvenient, com les versions anteriorment descrites, que no considera la possibilitat que hi hagi diferents nivells d'abstracció.

La metodologia Prometheus sí que permet considerar diferents nivells d'abstracció en la fase de disseny. Padgham<sup>68</sup> va proposar-la per desenvolupar sistemes d'agents intel·ligents que utilitzen objectius, creences, plans i esdeveniments. Es desenvolupa en tres fases, una primera d'especificació de funcions i dues de disseny, la darrera de les quals correspon al disseny detallat.

Cap de les metodologies esmentades inclou procediments de verificació i calibratge (exceptuant MaSE), ni expliciten el desplegament del sistema.<sup>72</sup> En aquest sentit, Zambonelli<sup>18</sup> descriu dificultats per tractar les problemàtiques reals amb metodologies genèriques. Per a l'autor, les problemàtiques que es resolen amb sistemes de menys de 100 agents segueixen majoritàriament un procés de desenvolupament adaptat a les seves necessitats específiques.

Les característiques de funcionament descrites per al sistema d'aigües residuals urbanes mostren un sistema de components heterogenis i una estructura organitzativa jerarquitzada. L'especificitat de les funcions individuals a realitzar necessita diferents implementacions cosa que comporta que el sistema que s'ha de conceptualitzar es constitueixi d'agents heterogenis. Les metodologies Gaia i MaSE es mostren adequades per a agents heterogenis, però cap és aplicable a una estructura jerarquitzada de rols (funcionalitats) en entorns limitats tal com es necessita. No obstant això, tant Gaia, en totes les seves versions, com MaSE i Prometheus, utilitzen un procés de desenvolupament en cascada<sup>72</sup> de conceptes com rols, interaccions i agents, la qual cosa sí que es pot aplicar per conceptualitzar l'abstracció del sistema objecte d'estudi.

A partir d'aquestes condicions, en aquest treball, s'ha seleccionat un procés de desenvolupament en cascada per desenvolupar el punt de vista extern del sistema a través de les etapes<sup>64</sup> següents:

- identificar els rols del sistema i les seves interaccions,
- definir els agents i el model d'agents,

- descriure l'estructura organitzativa dels agents,
- definir el model d'enllaços de comunicacions entre agents.

D'aquesta manera, a la primera etapa s'identifica la forma com s'espera que funcioni l'organització dels agents, mentre que a les següents, el tipus d'organització del funcionament proposat.

### 3.2. Cas d'estudi del sistema multiagent

La Fig. 3.1 presenta el diagrama de flux del cas d'estudi de sistema d'aigües residuals urbanes. Es consideren un conjunt de  $k$  habitatges amb un dipòsit de retenció de l'aigua generada; un sistema de recollida d'aigües d'escorrentia pluvial (o de fenòmens meteorològics en general) en xarxa separativa fins a un dipòsit de retenció; un conjunt d'activitats industrials  $Ind_i$  amb  $i \in \{1, \dots, n\}$ , cadascuna de les quals disposa d'un dipòsit de retenció, un sistema de tractament biològic amb eliminació de nutrients i una massa d'aigua receptora de les aigües residuals sanejades.

A l'abstracció, es concep el funcionament del sistema cíclic, en què cada cicle abasta un determinat període de temps (24 hores).

L'aigua residual es caracteritza a partir dels valors de contaminants que la legislació vigent assenyala per a l'efluent de l'EDAR: sòlids en suspensió ( $MES$ ), demanda bioquímica d'oxigen ( $DBO$ ), demanda química d'oxigen ( $DQO$ ), nitrogen total ( $NT$ ) i fòsfor total ( $PT$ ). Aquesta elecció no exclou la possibilitat d'usar o incorporar altres paràmetres, si es considera convenient. Els contaminants seleccionats es defineixen com el conjunt de contaminants  $x_r$ , amb  $(MES, DBO, DQO, NT, PT) = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ , per la qual cosa en aquest punt  $r = 1, \dots, 5$

Les aigües residuals d'origen domèstic es defineixen a partir d'un volum retingut  $L_{D0}$ , en el dipòsit de retenció amb concentracions de contaminants  $C_{D0}^r$  i una previsió de generació fins al

proper cycle de funcionament, cosa que implica una proposta d'aportació al sistema de tractament, és a dir, una previsió de volum retingut  $L_D$  i concentracions  $C_D^r$ .

Les aigües d'escorrentia pluvial parteixen d'un volum retingut  $L_{M0}$  amb concentracions de contaminants  $C_{M0}^r$  i una previsió que suposa una proposta d'aportació a l'EDAR de volum retingut  $L_M$  i concentracions  $C_M^r$  o una aportació a massa d'aigua receptora de volum  $V_{DM}$  i  $C_{DM}^r$

Les aigües residuals generades per cada activitat industrial s'especifiquen basant-se en un volum retingut  $L_{i0}$  i concentracions de contaminants  $C_{i0}^r$  així com en una previsió de nova generació, la qual cosa comporta una proposta d'aportació de volum d'aigua residual retinguda  $L_i$  amb concentracions  $C_i^r$ .

El sistema de tractament es descriu d'acord amb una disponibilitat en volum total  $V_{T0}$  i totals de càrregues de contaminants  $V_{T0}C_{T0}^r$ , com també amb una previsió de nova disponibilitat fins al proper cicle, cosa que comporta una disponibilitat, per al proper cicle, de volum  $V_T$  i càrregues contaminants  $V_T C_T^r$ .

La gestió dels compostos tòxics que poden contenir les aigües residuals industrials i que poden afectar el tractament biològic no s'estudia explícitament. La problemàtica pot ésser tractada mitjançant un procés d'argumentació entre agents, com el desenvolupat en el treball d'Aulinas,<sup>73</sup> que, junt a la proposta que es presenta, permetria abastar un ampli rang de característiques de l'aigua residual.

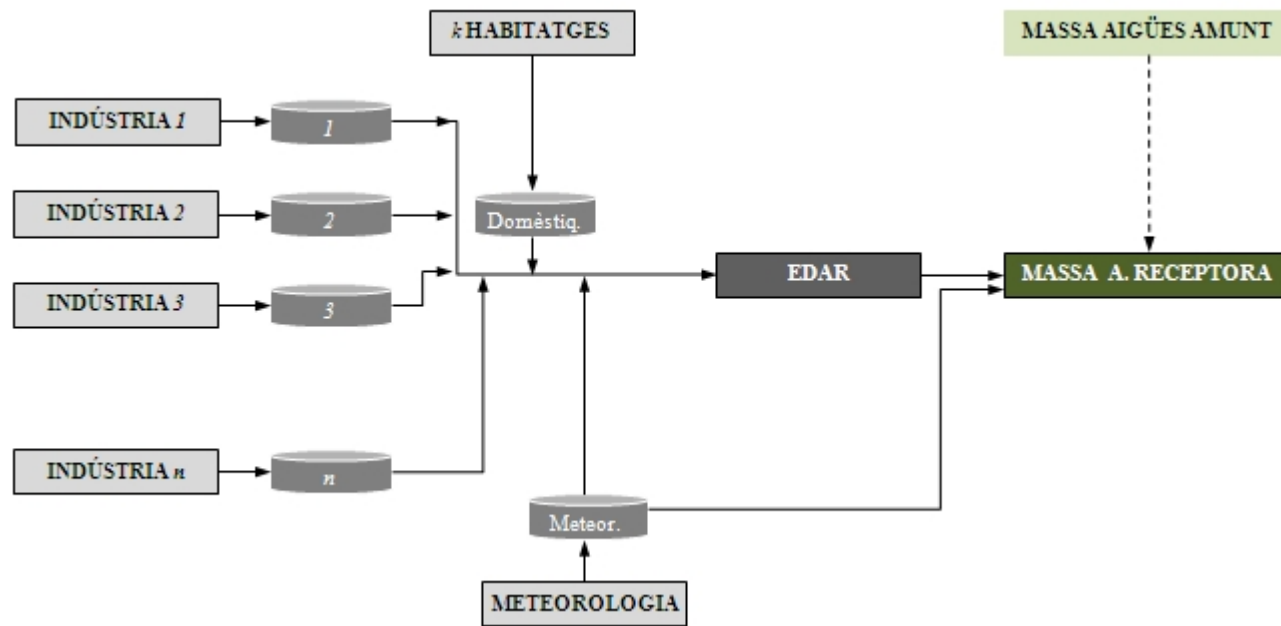


Fig. 3.1. Diagrama de flux del cas d'estudi



### 3.2.1. Rols i interaccions

Els rols defineixen el que s'espera que facin els agents en el sistema.<sup>52</sup> Es relacionen amb funcionalitats del sistema.<sup>20</sup> En el cas d'estudi s'han vinculat a les funcions requerides per assolir un funcionament adequat del sanejament.

La Fig. 3.2 mostra, esquemàticament, les tasques bàsiques del sistema d'aigües residuals urbanes. La coloració de cada funció és indicativa del subnivell organitzatiu al qual corresponen (recollida i transport, en gris clar, tractament, en gris fosc, massa d'aigua receptora, en verd fosc i conca, en verd clar). Les fletxes assenyalen quines funcions afecten d'altres funcions. Les línies discontinües emmarquen dos conjunts de tasques amb un grau d'interrelació elevat. Al primer, s'hi inclouen:

- la descàrrega del dipòsit de retenció d'aigües plujanes (o d'origen meteorològic, en general) a l'EDAR,
- la descàrrega d'aigües residuals d'origen domèstic a l'EDAR,
- les descàrregues dels dipòsits de retenció d'aigües residuals industrials a l'EDAR.

Cadascuna d'aquestes tasques s'executa de forma independent, però l'objectiu comú d'aconseguir un influent a l'EDAR que compleixi els requeriments (en volum i característiques de composició de l'aigua) d'una adequada eficàcia del tractament, fa necessari considerar la incorporació d'una nova funció que permeti gestionar, de forma òptima, els valors dels corresponents límits de funcionament individuals. A tal efecte es defineix el rol de *Coordinació de les aportacions a l'EDAR*, que es complementarà amb un rol de *Priorització de descàrregues d'aigües residuals industrials*.

El segon grup de tasques està constituït per:

- la incorporació del flux provinent de la massa aigües amunt,
- la incorporació de l'aigua residual tractada en la massa d'aigua receptora,
- la incorporació en el flux de la massa aigües avall.

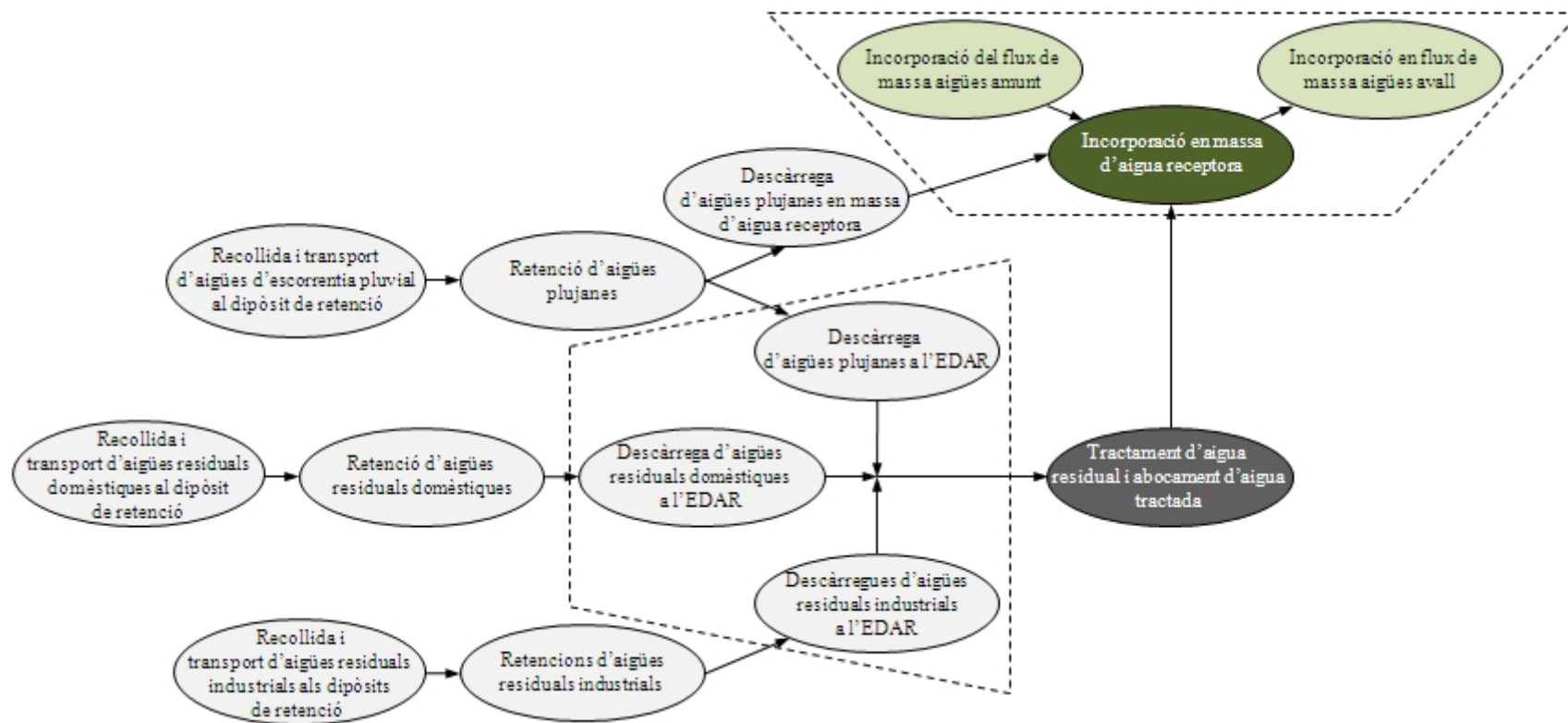


Fig. 3.2. Diagrama de funcions bàsiques del sistema d'aigües residuals urbanes

La segona és l'única de les tasques ubicada en el subnivell de la massa d'aigua receptora. Això no obstant, la incorporació de l'aigua residual tractada es realitza en unes condicions que depenen, entre d'altres, de les característiques de composició de la massa aigües amunt, la qual cosa deriva en una composició que determinarà la qualitat de la massa aigües avall. En aquest context, és necessària la incorporació d'un nou rol per a la coordinació entre masses d'aigua que permeti considerar el context global de la conca. Aquest rol s'ubica en el nivell més alt de l'estructura organitzativa del SARU (vegeu Fig. 2.1).

La Fig. 3.3 presenta el conjunt de rols del sistema computacional que es proposa. En discontinu, a la part inferior de la figura, s'emmarquen funcions associades a determinats rols, que o bé corresponen a tasques del SARU (recollida, transport i gestió del tractament) i/o s'han considerat convenientes (inspecció de la qualitat i previsió) per facilitar l'assoliment d'objectius. Les fletxes amb traçat discontinu assenyalen quins rols realitzen aquestes funcions.

Cal esmentar especialment els rols:

- **subordinats**<sup>52</sup> respecte a un rol director, és a dir, rols condicionats a l'execució d'un altre rol que realitza algun tipus de decisió jerarquizada respecte a ells. Aquest grup inclou els rols *Descàrrega d'aigües residuals domèstiques a l'EDAR*, *Descàrrega d'aigües plujanes a l'EDAR* i *Descàrrega d'aigües residuals industrials a l'EDAR*. Tots executen les seves funcions amb els valors que ha determinat el rol *Coordinació d'aportacions a l'EDAR* i que accepten com a vàlids per efectuar les descàrregues. D'altra banda, el rol *Establiment de restriccions excepcionals* executa les seves funcions subordinat a les decisions preses per tres rols (*Incorporació en massa d'aigua receptora*, *Coordinació entre masses d'aigua de la conca*, a més de *Tractament de l'aigua residual i abocament de l'aigua tractada*) que actuen com a directors. L'actuació d'aquests rols directors és de presa de decisió individual en cadascun dels contextos que abasten particularment;

- **directors**,<sup>52</sup> és a dir, rols que prenen decisions jerarquizades respecte a altres rols;

- **dependents** d'un altre rol vinculant que s'executa en el temps anterior, és a dir, rols que poden executar-se o no dependent del resultat de l'execució del rol vinculant. Aquests rols, a diferència dels subordinats, disposen de procediment de presa de decisió propi. El rol *Priorització de descàrregues d'aigües residuals industrials* és dependent del rol *Coordinació d'aportacions a l'EDAR*, en el sentit que l'execució dels càlculs de coordinació determinarà la

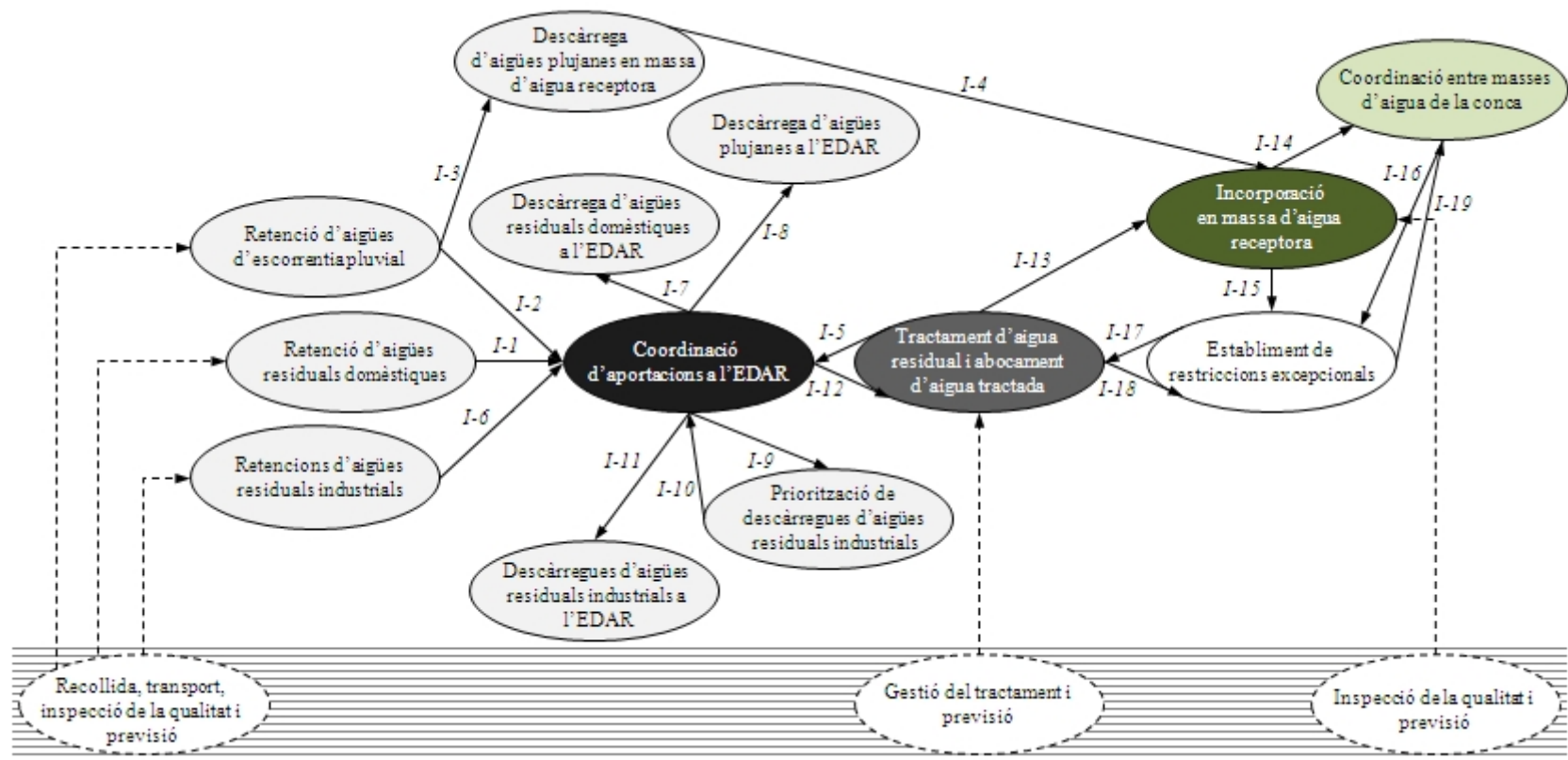


Fig. 3.3. Diagrama de rols i interaccions

necessitat (p.e. per falta de disponibilitat suficient del sistema de tractament) d'execució de la prioritització.

Per tal que els rols es puguin desenvolupar en el context del sistema d'una forma coherent amb els objectius, necessiten que els agents interaccionin amb el seu entorn i amb d'altres agents per intercanviar coneixement i coordinar actuacions, tal i com mostra la Fig. 3.4. Les interaccions amb l'entorn físic en què estan immersos, és a dir, les interaccions per a les mesures de caracterització de l'aigua als dipòsits de retenció, al tractament i a la massa d'aigua receptora, es realitzen a través de sensors. Les interaccions per actuar sobre aquest mateix entorn es realitzen mitjançant efectors. El rol *Coordinació d'aportacions a l'EDAR* (també els rols *Coordinació entre masses d'aigua de la conca* i *Establiment de restriccions excepcionals*) no disposa de sensors ni d'efectors que hi estiguin directament associats, però sí que ho estan indirectament a través dels rols de retenció i de descàrrega. Les interaccions dels agents amb d'altres agents es duen a terme sempre com a requeriment dels rols.<sup>52</sup>

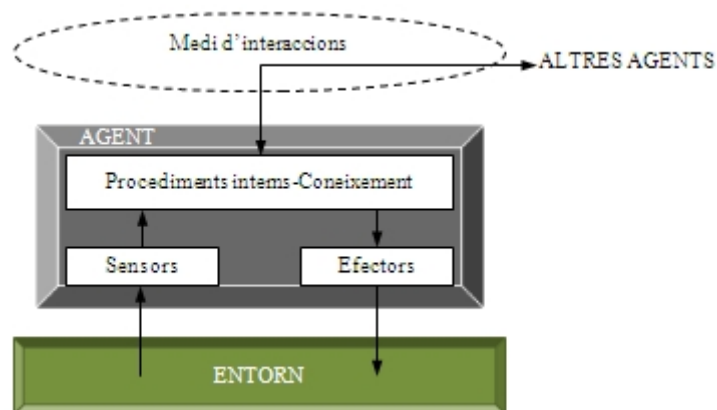


Fig. 3.4. Esquema d'un agent i de les seves interaccions

La Fig. 3.3 mostra, amb traçat continu, les interaccions (al nivell dels rols) necessàries perquè es puguin desenvolupar actuacions coherents amb els objectius a assolir. Les fletxes assenyalen el sentit que segueixen les interaccions. S'observa un node important, on conflueixen les interaccions I-1, I-2, I-5, I-6, I-7, I-8, I-9, I-10 I-11 i I-12, en el rol *Coordinació d'aportacions a*

*l'EDAR*, raó per la qual el seu procediment constitueix un factor clau del comportament del sistema.

La Taula 3.1 presenta el tipus d'informació objecte de cadascuna de les interaccions. En tots els casos es tracta de dades que no són directament accessibles per al rol receptor les quals, però, aquest necessita per poder adequar el seu funcionament als objectius comuns. En el cas que el context es considerés com a totalment reactiu, la interacció *I-12* constituiria l'excepció, ja que el sistema de tractament pot disposar de sensors que mesurin les dades de caracterització de l'aigua a l'entrada.

La Taula 3.2 enumera, en llenguatge natural, el tipus d'activitats i interaccions en què intervenen els rols. Les activitats de previsió d'aportacions d'aigua residual descrites per als rols *Retenció d'aigües residuals domèstiques*, *Retenció d'aigües d'escorrentia pluvial* i *Retencions d'aigües residuals industrials* fins al proper cicle d'execució, així com la de previsió de disponibilitat (en volum i càrregues de contaminants) per al rol *Tractament de l'aigua residual i abocament de l'aigua tractada*, constitueixen una forma de millorar la coherència de les actuacions a realitzar respecte a les que es realitzarien en un context reactiu,<sup>17</sup> cosa que permet buscar solucions a problemàtiques previsibles abans que es produeixin. A diferència dels anteriors, el rol *Establiment de restriccions excepcionals* pren decisions de previsió, quan escau, pel cicle següent de funcionament del sistema.

Taula 3.1. Interaccions dels rols

Interaccions			Informació objecte de la interacció
Nom	Rol iniciador	Rol receptor	
I-1	Retenció d'aigües residuals domèstiques	Coordinació d'aportacions a l'EDAR	Volum $L_D$ i característiques de composició globals $C_D^r$ de l'aigua residual domèstica que es proposa aportar a l'EDAR
I-2	Retenció d'aigües d'escorrentia pluvial	Coordinació d'aportacions a l'EDAR	Volum $L_M$ i característiques de composició $C_M^r$ globals de les aigües d'escorrentia pluvial que es proposa aportar a l'EDAR
I-3	Retenció d'aigües d'escorrentia pluvial	Descàrrega d'aigües plujanes en massa d'aigua receptora	Volum $V_{DM}$ d'aigües d'escorrentia pluvial que es preveu aportar directament a la massa d'aigua receptora
I-4	Descàrrega d'aigües plujanes en massa d'aigua receptora	Incorporació d'aigua tractada en massa d'aigua receptora	Volum $V_{DM}$ de les aigües plujanes que s'aporten directament a la massa d'aigua receptora
I-5	Tractament d'aigua residual i abocament d'aigua tractada	Coordinació d'aportacions a l'EDAR	Previsió de disponibilitat de l'EDAR en volum $V_T$ i càrregues de contaminants $V_T C_T^r$ per al proper cicle de funcionament
I-6	Retencions d'aigües d' residuals industrials	Coordinació d'aportacions a l'EDAR	Per a cada activitat industrial, volum $L_i$ i característiques de composició $C_i^r$ de l'aigua residual industrial que es proposa aportar a l'EDAR
I-7	Coordinació d'aportacions a l'EDAR	Descàrrega d'aigües residuals domèstiques a l'EDAR	Volum de descàrrega $V_D$ d'aigua residual domèstica autoritzada perquè pugui ser aportada a l'EDAR
I-8	Coordinació d'aportacions a l'EDAR	Descàrrega d'aigües plujanes a l'EDAR	Volum de descàrrega $V_M$ d'aigües plujanes autoritzades perquè puguin ser aportades a l'EDAR
I-9	Coordinació d'aportacions a l'EDAR	Priorització de descàrregues d'aigües residuals industrials	Volums $L_i$ i característiques de composició $C_i^r$ de les propostes d'aigües residuals industrials que es prioritzaran per autoritzar-ne les aportacions a l'EDAR

I-10	Priorització de descàrregues d'aigües residuals industrials	Coordinació d'aportacions a l'EDAR	Volums $V_i$ de les descàrregues d'aigües residuals industrials autoritzades, després de la prioritització, perquè puguin ser aportades a l'EDAR. Dades $\sum_{i=1}^n V_i$ i $\sum_{i=1}^n V_i C_i^r$
I-11	Coordinació d'aportacions a l'EDAR	Descàrregues d'aigües residuals industrials a l'EDAR	Volums de les descàrregues d'aigües residuals industrials, $V_{in}$ si no es realitza procés de prioritització o $V_i$ si es realitza la prioritització, autoritzades perquè puguin ser aportades a l'EDAR
I-12	Coordinació d'aportacions a l'EDAR	Tractament d'aigua residual i abocament d'aigua tractada	Volums $V_D$ i $V_M$ i composicions $V_D C_D^r$ i $V_M C_M^r$ , i si no s'ha prioritzat $\sum_{i=1}^n V_{in}$ i $\sum_{i=1}^n V_{in} C_i^r$ , o, si s'ha prioritzat $\sum_{i=1}^n V_i$ i $\sum_{i=1}^n V_i C_i^r$
I-13	Tractament d'aigua residual i abocament d'aigua tractada	Incorporació en massa d'aigua receptora	Volum $V_e$ i característiques de composició $C_e^r$ de l'efluent de l'EDAR
I-14	Incorporació en massa d'aigua receptora	Coordinació entre masses d'aigua de la conca	Característiques de composició $C_{MA}^r$ de l'aigua en la massa d'aigua receptora
I-15	Incorporació en massa d'aigua receptora	Establiment de restriccions excepcionals	Paràmetres de composició, que de forma temporal i excepcional, es preveu que s'hauran de restringir en una nova aportació a la massa d'aigua receptora per garantir-ne l'objectiu de qualitat
I-16	Coordinació entre masses d'aigua de la conca	Establiment de restriccions excepcionals	Paràmetres de composició, que de forma temporal i excepcional, es preveu que s'hauran de restringir per garantir la qualitat de l'aigua en la massa d'aigua receptora, com a conseqüència de la qualitat aigües amunt
I-17	Establiment de restriccions excepcionals	Tractament d'aigua residual i abocament d'aigua tractada	Paràmetres de composició que, de forma temporal i excepcional, s'han de restringir en les aportacions del proper cicle
I-18	Tractament d'aigua residual i abocament d'aigua tractada	Establiment de restriccions excepcionals	Paràmetres de composició que, de forma temporal i excepcional, es preveu que s'hauran de restringir en aportacions a la conca a causa d'un mal funcionament de l'EDAR
I-19	Establiment de restriccions excepcionals	Coordinació entre masses d'aigua de la conca	Paràmetres de composició que, de forma temporal i excepcional, es preveu que s'hauran de restringir en possibles descàrregues aigües avall per garantir la qualitat de l'aigua en la conca



Taula 3.2. Descripció d'activitats dels rols i interaccions en què prenen part

Rols	Descripció d'activitats. Interaccions dels rols
Retenció d'aigües residuals domèstiques	Lectura de sensors. Determinació de característiques $L_{D0}$ i $C_{D0}^r$ de l'aigua al dipòsit de retenció. Càlculs de previsió de generació d'aigua residual domèstica fins al proper cycle, amb determinació dels valors $L_D$ i $C_D^r$ de l'aigua que es proposa aportar a l'EDAR. Gestió de la recollida i transport. I-1
Retenció d'aigües d'escorrentia pluvial	Lectura de sensors. Determinació de característiques $L_{M0}$ i $C_{M0}^r$ de l'aigua al dipòsit de retenció. Càlculs de previsió de noves aportacions d'aigües plujanes fins al proper cycle. Presa de decisió d'aportació a l'EDAR o d'aportació a massa d'aigua receptora de $V_{DM}$ . Valors de volum $L_M$ i característiques de composició $C_M^r$ de l'aigua que es proposa aportar a l'EDAR. Gestió de la recollida i transport. I-2, I-3
Descàrrega d'aigües plujanes en massa d'a. receptora	Actuació d'efectors per a la descàrrega de $V_{DM}$ . I-4
Retencions d'aigües residuals industrials	(A cada activitat industrial) Lectura de sensors. Determinació de característiques $L_{i0}$ i $C_{i0}^r$ de l'aigua al dipòsit retenció. Càlculs de previsió de generació d'aigua residual industrial fins al proper cycle. Determinació de valors $L_i$ i $C_i^r$ de l'aigua que es preveu tenir retinguda i que es proposa aportar a l'EDAR. Gestió de la recollida i transport. I-6
Coordinació d'aportacions a l'EDAR	Procediment de coordinació entre la disponibilitat prevista a l'EDAR en volum $V_T$ i càrregues de contaminants $V_T C_T^r$ per al proper cycle de funcionament, i les previsions corresponents a aportacions d'aigües residuals domèstiques $L_D$ i $L_D C_D^r$ i d'aigües plujanes $L_M$ i $L_M C_M^r$ . Càlcul de la disponibilitat $V$ i $C^r$ , per a aigües residuals industrials. Càlculs de $\sum_{i=1}^n L_i$ i $\sum_{i=1}^n L_i C_i^r$ . Presa de decisió sobre la realització del procés de prioritització d'efluents industrials. Determinació de $V_D$ , $V_M$ com a descàrregues autoritzades a poder ser aportades a l'EDAR amb l'addició de les descàrregues d'aigües industrials $V_{in}$ si no es realitza procés de prioritització <sup>(*)</sup> o $V_i$ si es realitza. I-1, I-2, I-5, I-6, I-7, I-8, I-9, I-10, I-11, I-12
Descàrrega d'aigües residuals domèstiques a l'EDAR	Actuació d'efectors per a la descàrrega de $V_D$ . I-7
Descàrrega d'aigües plujanes a l'EDAR	Actuació d'efectors per a la descàrrega de $V_M$ . I-8

Priorització de descàrregues d'aigües residuals industrials	<p>Procediment de priorització de les descàrregues d'aigües residuals industrials caracteritzades pels valors de <math>L_i</math> i <math>C_i^r</math>.</p> <p>Determinació dels valors de <math>V_i</math>, <math>\sum_{i=1}^n V_i</math>, <math>\sum_{i=1}^n V_i C_i^r</math> autoritzats a poder ser aportats a l'EDAR. I-9, I-10</p>
Descàrregues d'aigües residuals industrials a l'EDAR	Actuació d'efectors per a les descàrregues $V_{in}$ sense priorització o $V_i$ amb priorització. I-11
Tractament d'aigua residual i abocament d'aigua tractada	<p>Lectura de sensors. Determinació de l'estat del tractament, valors <math>V_{T0}</math> i <math>C_{T0}^r</math>. Comprovació de les restriccions excepcionals. Càlculs de previsió de disponibilitat de l'EDAR en volum <math>V_T</math> i càrregues de contaminants <math>V_T C_T^r</math> per a noves aportacions d'aigües residuals fins al proper cicle de funcionament, incorporant, quan calgui, les restriccions temporals i excepcionals. Gestió del tractament i l'abocament. Control de les característiques de composició <math>V_e</math> i <math>C_e^r</math> de l'efluent del tractament. Presa de decisió, si cal, de previsió de la necessitat d'establir restriccions excepcionals a causa d'un mal funcionament de l'EDAR. I-5, I-12, I-13, I-17, I-18</p>
Incorporació en massa d'aigua receptora	Lectura de sensors. Determinació de característiques de composició $C_{MA}^r$ de l'aigua en la massa d'aigua receptora i estat de qualitat. Presa de decisió, si cal, de previsió de la necessitat d'establir restriccions excepcionals per l'estat de la massa d'aigua receptora. I-4, I-13, I-14, I-15
Establiment de restriccions excepcionals	Determinació sobre la restricció temporal i excepcional de paràmetres de composició en noves aportacions al tractament o a la massa aigües avall de la conca. I-15, I-16, I-17, I-18, I-19
Coordinació entre masses d'aigua de la conca	Coordinació dels estats de qualitat de l'aigua en les diferents masses d'aigua que constitueixen la conca. I-14, I-16, I-19

---

(\*) Vegeu l'especificació dels procediments de coordinació i priorització del efluents industrials al Punt 3.3

### 3.2.2. Model d'agents

Un agent pot estar format per un o diversos rols, depenent dels objectius; un rol pot estar compartit per més d'un agent.<sup>21</sup> El model d'agents del cas d'estudi s'ha definit amb un eix central compost pels tipus d'agents i dos conjunts de nodes laterals formats pels rols, amb connexions que relacionen cada rol amb el tipus d'agent o agents que el desenvolupen. La Fig. 3.5 mostra el model d'agents proposat, el qual està format pels agents: A. Domèstiques, Meteorologia, Indústria, Coordinador, EDAR, A. Receptora i Consell de conca. Tot i que els components, amb excepció dels agents Coordinador i Consell de conca, corresponguin, tal i com succeeix en abstraccions d'aplicacions reals, a components físics, el fet d'introduir-hi nous components computacionals comporta poder canviar a una forma de funcionament diferent.<sup>52</sup>

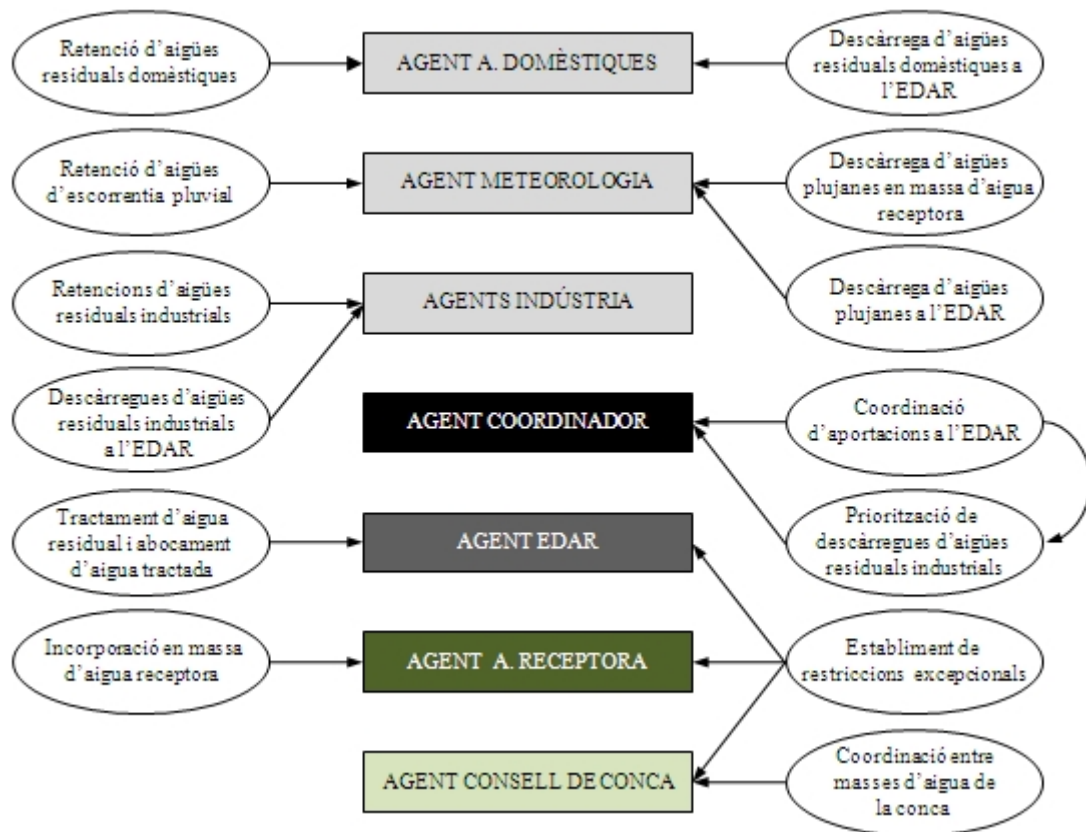


Fig. 3.5. Model d'agents

Amb la definició d'aquest model, algunes de les interaccions entre rols que s'han agrupat en un tipus d'agent, passen a desenvolupar-se al nivell intern dels agents. Aquest grup d'interaccions estaria format per *I-3*, la qual està relacionada amb la presa de decisió de descàrrega d'aigües plujanes en la massa d'aigua receptora de l'agent Meteorologia, a més a més de *I-9* i *I-10*, vinculades al procés de prioritització de les aigües residuals industrials de l'agent Coordinador. En forma similar, les interaccions de rols que són compartits per més d'un agent tal com són *I-15*, *I-16* i *I-18*, les quals actuen per a la presa de decisió de l'establiment de restriccions excepcionals, passen a desenvolupar-se al nivell intern de cadascun dels agents A. Receptora, Consell de Conca i EDAR, respectivament. A efectes de facilitar-ne l'execució, cadascun d'aquests agents incorpora el rol però abastant únicament la funció corresponent al seu propi entorn, per la qual cosa s'han desglossat tres funcions: una, amb percepció dels sensors en la massa d'aigua receptora (agent A. Receptora), una altra, en la massa d'aigües amunt (agent Consell de conca) i, una darrera, en el sistema de tractament (agent EDAR).

### 3.2.3. Estructura organitzativa

Sycara<sup>17</sup> descriu l'estructura organitzativa com el patró de les relacions d'informació i control que existeixen entre els agents i la distribució de les capacitats de resolució de problemes entre ells.

La Fig. 3.5 mostra l'estructura organitzativa de la presa de decisions dels agents.

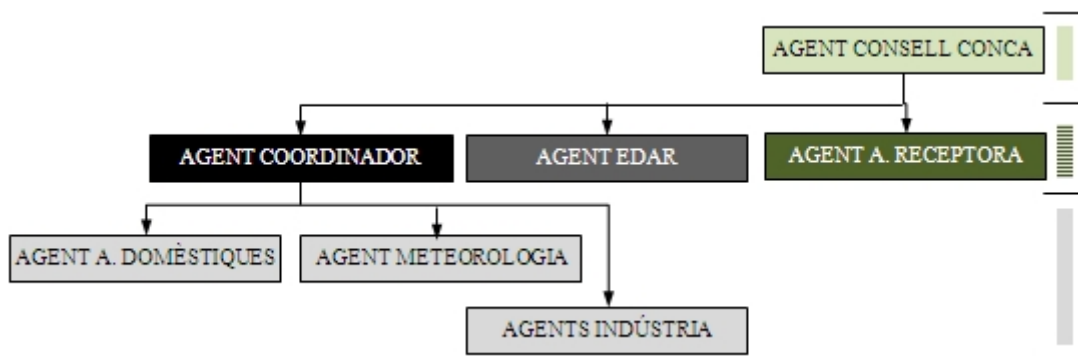


Fig. 3.6. Estructura organitzativa dels agents

Els agents presenten una estructura jerarquizada en tres nivells organitzatius:

- el més baix correspon als agents A. Domèstiques, Meteorologia i Indústria. L'objectiu comú del subnivell és assolir unes aportacions que s'adeqüin a la capacitat disponible de l'EDAR. D'acord amb aquest objectiu, els agents Indústria s'ubiquen en el subnivell més baix, atès que les seves descàrregues dependran de les aportacions a l'EDAR dels agents A. Domèstiques i Meteorologia;

- l'intermedi correspon als agents Coordinador, EDAR i A. Receptora. Entre si els agents constitueixen una organització plana,<sup>17</sup> de manera que cada agent actua com a especialitzat en resoldre els problemes d'un tipus: la coordinació de les aportacions d'aigües residuals a l'EDAR, el tractament de les aigües residuals i la incorporació de l'aigua tractada, respectivament. La seva comunicació permet ajustar les seves decisions i comportaments. Respecte al nivell inferior, l'agent Coordinador actua per resoldre la problemàtica de regulació de les aportacions d'aigües residuals a l'EDAR. La interacció entre l'agent Coordinador i els agents A. Domèstiques, Meteorologia i Indústria es produeix a través de comunicacions directes verticals (per la jerarquizació com a rols director i subordinats respectivament) en ambdós sentits;

- el més elevat correspon a l'agent Consell de conca. Aquest actua, entre d'altres, per solucionar problemàtiques de qualitat de l'aigua residual, coordinant les diferents masses d'aigua que componen la conca. En aquest context, pren decisions de forma jerarquizada respecte a les dades adquirides de l'agent A. Receptora i, a més, respecte a les adquirides d'altres masses aigües amunt. Actua prenent la decisió, si cal, d'establir restriccions excepcionals en les aportacions admissibles al tractament.

### **3.2.4. Model d'enllaços de comunicacions dels agents**

El model s'ha elaborat com un model de coneguts<sup>20</sup> per indicar els enllaços comunicatius entre els diferents tipus d'agents. Permet la identificació de possibles colls d'ampolla que podrien causar problemes durant l'execució del sistema. La Fig. 3.7 mostra els agents del sistema, les seves comunicacions i les direccions en què s'executen. Els rectangles presenten les principals tasques del sistema d'aigües residuals vinculades a cadascun dels agents. Sobre cadascun dels enllaços de comunicació, s'han assenyalat les interaccions entre rols dels agents implicats. Per

al desenvolupament d'aquestes comunicacions es necessita un medi d'interaccions<sup>52</sup> (p.e. una xarxa de comunicacions).

Cal esmentar específicament els dos enllaços: *I-17a* (de l'agent A. Receptora cap a l'agent EDAR) i *I-17b* (de l'agent Consell de conca cap a l'agent EDAR), els quals deriven de la interacció *I-17* (corresponent a la comunicació de dades del rol *Establiment de restriccions excepcionals* al rol *Tractament d'aigua residual i abocament d'aigua tractada*). El rol *Establiment de restriccions excepcionals* s'ha desglossat en l'establiment de restriccions excepcionals a causa: d'un inadequat funcionament del tractament (agent EDAR), l'estat de la massa d'aigua receptora (agent A. Receptora) i l'estat aigües amunt (agent Consell de conca), per la qual cosa es fa necessari l'establiment dels dos enllaços comunicatius proposats.

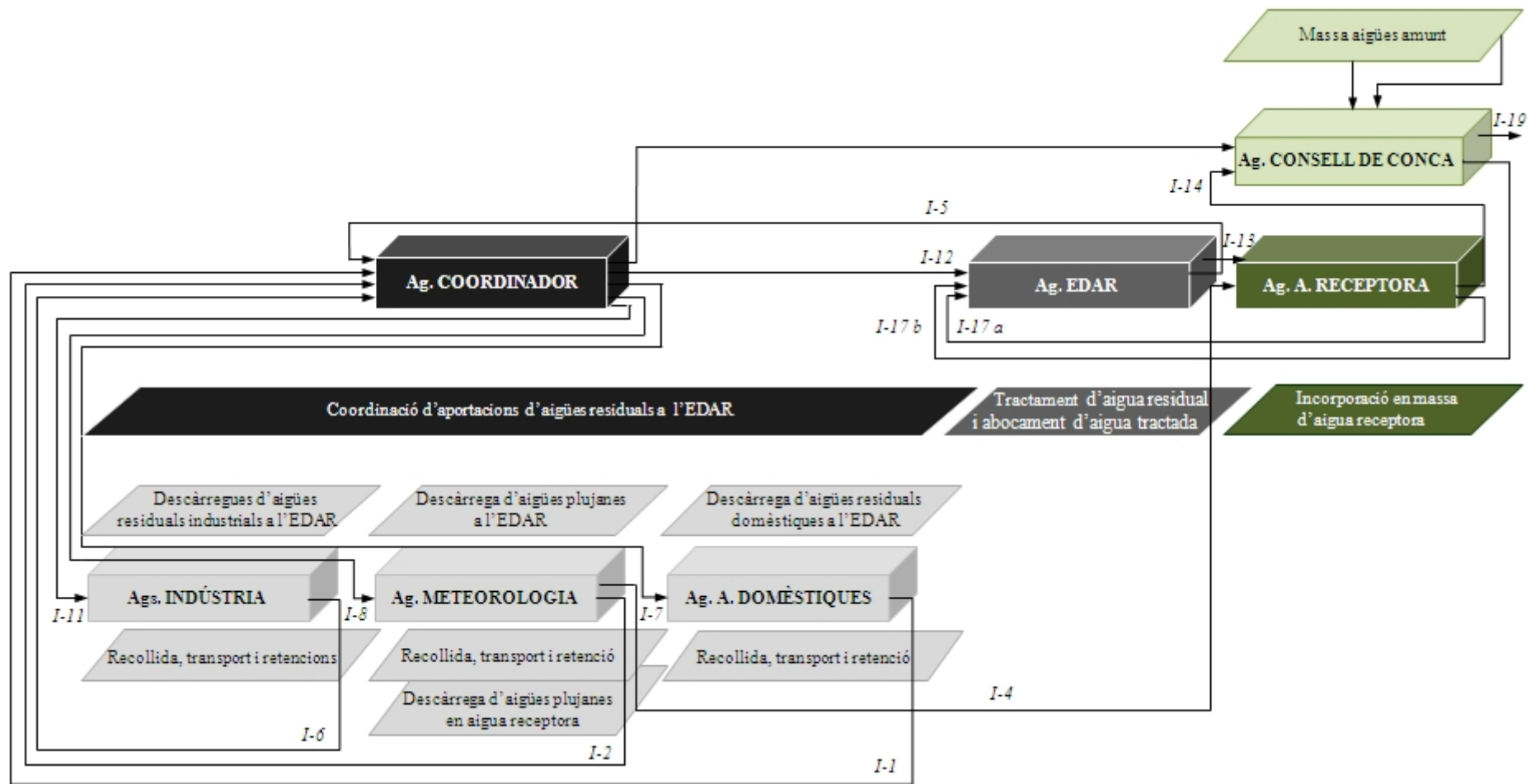


Fig. 3.7. Diagrama d'enllaços comunicatius dels agents

### **3.2.5. Diagrama de funcionament global**

La Fig. 3.8 presenta el diagrama de funcionament global del SMA proposat. A la part esquerra de la figura es poden observar els períodes de temps en què s'han desglossat les principals activitats que executen els agents i les seves interaccions. S'hi han inclòs totes les interaccions, tant les internes entre rols d'un agent, com les que es desenvolupen entre agents. Els intervals de temps assenyalats a la part esquerra de la figura no defineixen una durada de temps constant, sinó que pretenen reflectir l'ordre d'execució i la simultaneïtat, si ve al cas, de les accions desenvolupades pels diferents agents en el decurs d'un cicle de funcionament del sistema.





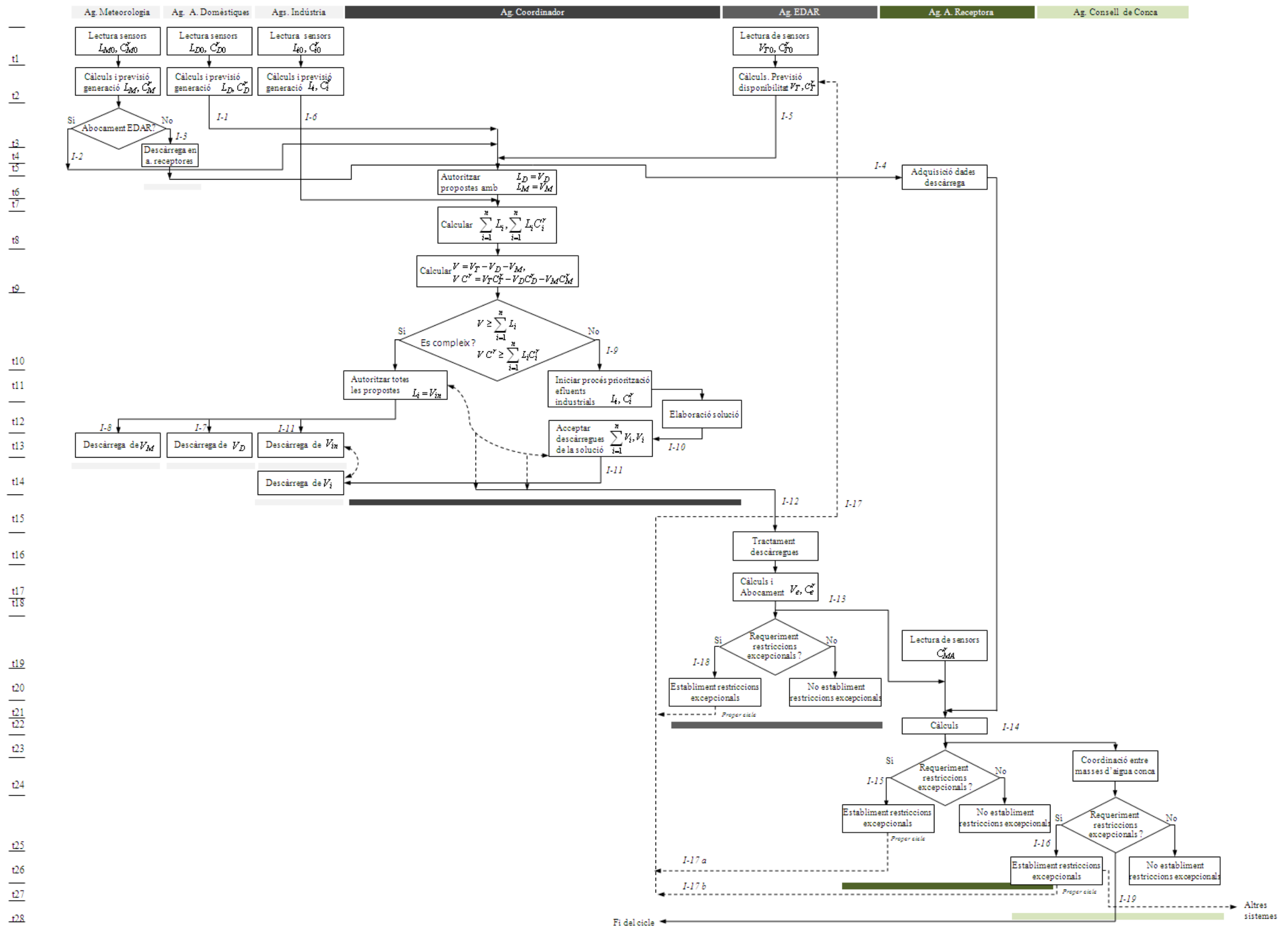


Fig. 3.8. Diagrama de funcionament global



### **3.3. L'agent Coordinador**

Definides l'estructura dels agents i les seves relacions, s'identifica un punt clau del procés en la coordinació entre les característiques dels efluentis industrials retinguts i les corresponents a les condicions de l'EDAR, per a la seva admissió. Quan la capacitat disponible a l'EDAR és suficient per poder acceptar tots els efluentis industrials, s'executa la tasca de coordinació de descàrregues. Això no obstant, sorgeixen dificultats de gestió quan el global d'aigües residuals industrials excedeix la capacitat disponible de l'EDAR, ja sigui mesurat en termes de volum o en termes de capacitat de tractament per a contaminants específics o ambdós. Per resoldre-ho, l'agent Coordinador executa un procés de prioritització de les descàrregues d'aigües residuals industrials quan l'EDAR no disposa de capacitat suficient per admetre totes les propostes.

Els dos objectius bàsics de l'agent Coordinador en el procés de prioritització de descàrregues industrials són:

- aconseguir una òptima combinació de descàrregues d'aigües residuals industrials atenent la capacitat màxima disponible del sistema de tractament,
- evitar sobrecàrregues a l'EDAR, per tal de garantir-ne el funcionament dins els límits establerts pels valors dels seus paràmetres de disseny.

#### **3.3.1. Coordinació d'abocaments. Priorització d'efluentis industrials**

L'agent Coordinador executa els seus propis cicles, establerts cada 24 hores, per tal de prendre en cadascun una decisió sobre els volums d'efluentis industrials autoritzats a ésser descarregats. La Fig. 3.9 mostra el diagrama de decisió que segueix cada cicle. Tal i com es pot observar del seguiment de les etapes 1 a 7, se'n deriven les regles següents de decisió.

##### **1. Adquisició de dades de l'agent Aigües Domèstiques**

En aquesta etapa, es concreta l'abocament d'aigües residuals domèstiques que es preveu realitzar fins al proper cicle (properes 24 hores).

## 2. Adquisició de dades de l'agent Meteorologia

En aquesta etapa, es defineix la recollida d'aigües plujanes o d'origen meteorològic que es preveu realitzar fins al proper cicle. Si les inclemències meteorològiques superessin la capacitat de retenció màxima prevista, l'excés d'aigües seria desviat cap a la llera receptora.

## 3. Adquisició de dades de l'agent EDAR i càlculs.

En aquesta etapa, es concreta l'estat de disponibilitat de l'EDAR. Es determinen el volum total i les càrregues de contaminants que és capaç d'admetre el sistema de tractament fins al proper cicle global. Seguidament, es comptabilitzen les propostes d'aportacions d'aigües residuals d'origen domèstic i meteorològic, que sempre es consideren autoritzades i es calcula la disponibilitat que restarà per a les aigües residuals industrials.

## 4. Adquisició de dades dels agents Indústria

En aquesta etapa, es concreten les descàrregues que proposen realitzar les activitats industrials fins al proper cicle.

## 5. Priorització i acceptació de descàrregues

Si l'EDAR no disposa de suficient capacitat per acceptar totes les descàrregues d'aigües residuals industrials proposades, s'inicia un procés d'optimització combinatòria (5a). De la seva execució es deriven les descàrregues industrials a autoritzar; en altre cas, s'autoritzen totes (5b).

## 6. Acceptar les descàrregues industrials proposades en l'etapa 5a.

7. Enviament de les dades de descàrregues autoritzades als agents A. Domèstiques, Meteorologia, Indústria i EDAR.

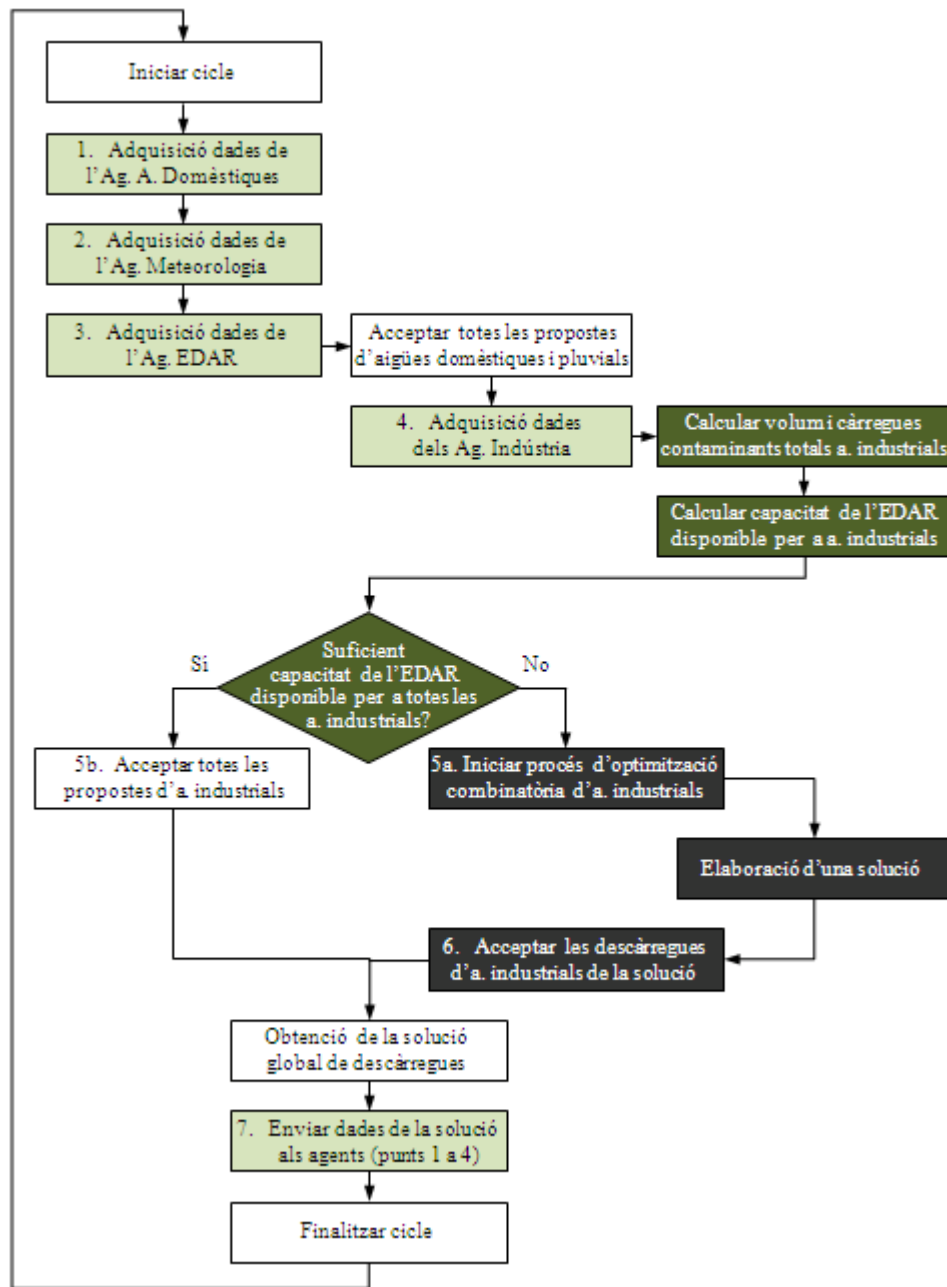


Fig.3.9. Diagrama de funcionament de l'agent Coordinador

### 3.3.2. Procés d'optimització combinatòria

La prioritització dels efluents industrials proposada es defineix com un procés d'optimització combinatòria de característiques similars a les que presenta el problema computacional de la *motxilla*.<sup>74,75</sup> Aquest tipus de problema està inclòs en el grup de problemes *NP-Hard*, els quals es caracteritzen per la dificultat en aconseguir trobar una solució exacta en temps polinomial en una màquina de Turing no determinista.

El problema modelitza el fet d'omplir una motxilla amb una capacitat limitada de pes, amb objectes seleccionats d'una sèrie, cadascun dels quals té el seu propi pes i valor econòmic, de manera que els que s'introdueixen a la motxilla aporten un valor global màxim, sense sobrepassar el pes total que pot admetre la motxilla. En l'abstracció del problema, la motxilla correspon a l'EDAR, la seva capacitat, a la capacitat màxima que té disponible l'EDAR per acceptar volums i càrregues contaminants influents. Cada objecte susceptible d'ésser introduït a la motxilla i el seu valor s'identifiquen amb cada possible descàrrega d'aigua residual, definida en termes de volum i càrregues contaminants, i el seu cost associat. Per altra banda, les capacitats d'admissió de volum i càrregues contaminants a l'EDAR impliquen la introducció de múltiples restriccions al procés d'optimització combinatòria del plantejament genèric, de forma que el procés es pot concebre com a similar a un problema de la *motxilla multidimensional*.<sup>75,76</sup> La diferència bàsica està en què mentre en aquest, els objectes no es poden fraccionar, els efluents industrials permeten fer un plantejament amb diferents possibilitats de descàrrega volumètrica.<sup>23</sup>

#### *Mètodes de resolució. Estat de la tècnica i selecció*

El problema de la *motxilla* ha estat abastament tractat a la bibliografia amb algorismes principalment basats en *branch-and-bound*, *core* i programació dinàmica tal i com s'assenyala als treballs de revisió de Martello,<sup>77</sup> Pisinger,<sup>78</sup> i Jukna<sup>79</sup>. Tots esmenten dificultats en la resolució de problemes que impliquen un gran nombre de variables. Fréville<sup>75,80</sup> també remarca l'augment de la complexitat del problema quan aquest comporta tractar amb un nombre elevat de variables i més de dues restriccions, alhora que descriu l'elevada dificultat que presenta la seva resolució per mètodes exactes. En aquest context, l'autor proposa l'ús de

metaheurístiques basades en cerca local iterativa.<sup>81</sup> Concretament proposa la metaheurística anomenada *Tabu Search*<sup>82</sup> (TS).

Per la seva part, Voß<sup>83</sup> coincideix que la complexitat relacionada amb un gran nombre de variables associades al problema, dificulta la solució per mètodes exactes, per tant, proposa l'aplicació de mètodes heurístics i metaheurístics, sense concloure quin mètode es pot considerar millor per a determinats criteris. Amb tot, Blum<sup>84</sup> sí que presenta una comparació de metaheurístiques per a optimització combinatoria, basant-se en la forma d'implementació dels conceptes d'intensificació i diversificació en el procés de cerca de solució. Entre d'altres, classifica els mètodes en: de trajectòria i basats en una població. Analitza com a mètodes de trajectòria: *Basic local search-Iterative improvement*<sup>85</sup> (BLS), *Simulated Annealing*<sup>86</sup> (SA), *Tabu Search* (TS) i els *Explorative Local Search*; i com a mètodes basats en una població: *Evolutionary Computation*<sup>87</sup> (EC) i *Ant Colony Optimization*<sup>22</sup> (ACO). Conclou que tots els mètodes metaheurístics estudiats utilitzen una etapa de cerca focalitzada en l'anàlisi de veïns en la regió de solucions (intensificació) i usen mecanismes per fer tendir la cerca de solució cap a regions de l'espai de solucions inexplorades (diversificació), al mateix temps que es presenten algunes diferències de comportament en l'àmbit de sotstasques de la cerca. L'autor finalitza destacant les bones perspectives de la proposta d'hibridació de metaheurístics, la qual inclou la d'utilització de mètodes de trajectòria (per exemple BLS) hibridats amb mètodes basats en una població.

Zlochin<sup>88</sup> també esmenta la dificultat dels algorismes que utilitzen mètodes exactes per solucionar problemes complexos eficaçment, i realitza una anàlisi comparativa dels algorismes basats en heurístics (l'autor considera el terme en un sentit ampli que inclou els mètodes metaheurístics). Classifica els mètodes de cerca com a *instance-based* i *model-based* (MBS). El primer grup abasta els mètodes en els quals es generen noves generacions candidates a solució emprant únicament la solució anterior o la població anterior de solucions; inclou els algorismes genètics (dins els EC) o la cerca local (i les seves variants com SA i BLS<sup>85</sup>). El segon grup engloba els mètodes que generen solucions candidates utilitzant un model, entès com a mecanisme probabilístic parametritzat que s'actualitza, de forma que la cerca es va concentrant en les regions que contenen solucions de qualitat elevada, cosa que l'autor<sup>88,89</sup> remarca com una avantatge dels MBS, respecte als mètodes *instance-based*. MBS inclou la metaheurística ACO, *stochastic gradient ascent* (SGA), *cross-entropy* (CE) i *estimation of distribution algorithms* (EDAs). L'autor conclou que aquests darrers mètodes funcionen de manera similar,



especialment quan estan hibridats amb mètodes de cerca local. Recentment, el treball de revisió de metaheurístiques per optimització combinatòria de Bianchi<sup>90</sup> mostra els mètodes com a fàcilment adaptables per resoldre problemàtiques reals.

La conclusió de la revisió és que un MBS ofereix bones perspectives per a la resolució del problema de la prioritització del efluents industrials.

D'altra banda, el plantejament del problema presenta les següents característiques:

- les indústries i les possibles descàrregues d'aigües residuals industrials formen un conjunt  $N$  de components, que és finit,
- les possibles descàrregues per a cada indústria defineixen un conjunt  $E$  de connexions entre els components,
- els components i les connexions tenen assignats un conjunt de restriccions,
- els estats del problema es poden definir en termes de totes les possibles seqüències ordenades de parelles de components, el primer dels quals és una indústria i el segon, la seva corresponent descàrrega, de manera que existeix un conjunt amb totes les possibles seqüències de components i un subconjunt de les que compleixen les restriccions. Les seqüències d'aquest subconjunt definiran els estats factibles del problema,
- es pot definir una estructura de veïnatge per al conjunt de seqüències,
- una solució es pot definir com un element del subconjunt de totes les seqüències possibles que compleixen les restriccions,
- es pot associar un cost a cada solució.

A més, el problema es pot representar com un graf  $G=(N,E)$  on  $N$  és el conjunt de components i  $E$ , de connexions. Les solucions es poden expressar com a recorreguts que compleixen les restriccions, per la qual cosa la cerca de solució es pot basar en la construcció d'un recorregut en el graf, és a dir, en la construcció basada en una funció objectiu d'una seqüència ordenada de components que compleix les restriccions.

Totes les característiques descrites s'ajusten, amb especificitats pròpies del problema objecte d'estudi, a les definides per Dorigo i Di Caro<sup>22,91</sup> com a inherents als tipus de problemes que la metaheurística ACO pot resoldre, per la qual cosa es considera que la metaheurística ACO és adequada per a la resolució de la prioritització de les descàrregues d'aigües residuals industrials.

Es proposa la instanciació de la metaheurística ACO mitjançant diferents versions algorísmiques ACO, les quals s'hibriden, en tots els casos, amb dos algorismes de millora de la solució construïda que utilitzen mètodes de cerca local.<sup>92-94</sup>

### *Metaheurística ACO*

La metaheurística ACO va ésser proposada per Dorigo i Di Caro<sup>22</sup> per resoldre problemes complexos d'optimització combinatoria.<sup>92,94</sup> El mètode s'aplica a tots els algorismes basats en un sistema (població) de formigues artificials i que deriven de l'algorisme anomenat *Ant System* (AS),<sup>93</sup> incloent *Max – Min Ant System*<sup>24</sup> i *Hypercube*<sup>25</sup>. S'han aplicat algorismes ACO per solucionar diferents tipus de problemes computacionals,<sup>91,92,94</sup> entre els quals hi ha el problema de la *motxilla multidimensional*.

La forma bàsica de funcionament de la metaheurística, segons descriu Blum,<sup>95</sup> consisteix que havent definit el problema d'optimització combinatoria, es defineix, per una part, el conjunt de components a partir dels quals ha de sorgir la solució del problema i, per altra, s'estableix un conjunt de valors de feromona que constitueixen el model de feromona. El procediment és iteratiu i consta de dues etapes:

- es construeixen solucions candidates emprant el model de feromona, o sigui una distribució de probabilitats sobre l'espai de cerca de solucions,
- les solucions candidates s'utilitzen per modificar els valors de feromona de manera que es tendeix a concentrar la cerca en regions de l'espai de cerca que continguin solucions d'alta qualitat.

### **Plantejament del problema<sup>23</sup>**

Es considera un sistema d'activitats industrials  $Ind_i$  amb  $i \in \{1, \dots, n\}$ . Per a cada activitat, es disposa d'un dipòsit de retenció de l'aigua residual, amb una previsió de volum retingut  $L_i$ , que presenta possibilitats diferents de descàrrega volumètrica  $V_i^j, j \in \{0, \dots, l_i\}$ , les quals s'han seleccionat com un múltiple del número 100, de forma que  $100j = V_i^j$  amb  $100l_i = L_i$ . A l'aigua residual retinguda, es consideren els contaminants assenyalats per la legislació vigent sobre caracterització del flux total de sortida de l'EDAR, sòlids en suspensió ( $MES$ ), demanda bioquímica d'oxigen ( $DBO$ ), demanda química d'oxigen ( $DQO$ ), nitrogen total ( $NT$ ) i fòsfor total ( $PT$ ). Aquests valors es defineixen, a efectes de simplificació de la nomenclatura, com el conjunt de contaminants  $x_r$  amb  $(MES, DBO, DQO, NT, PT) = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ , i concentracions  $C_i^r, r = 1, \dots, 5$ . Les descàrregues d'aigua residual industrial constitueixen l'influent total de l'EDAR, la qual presenta una disponibilitat, per a aquest influent, de volum total  $V$  i concentracions de contaminants  $C^r, r = 1, \dots, 5$ .

S'assignen les variables següents:

a) Un cost unitari  $P^r$  i un pes  $w^r$  a cada contaminant  $x_r$ , en funció dels requeriments per al seu tractament. Aquests dos valors es consideren de forma individual, i per igual per a totes les activitats industrials, tal i com es presenta a l'escenari de referència.

b) Un coeficient punta  $T_i^r = f(C_i^r, \bar{X}_i^r)$  definit a la Taula 3.3 que s'assigna a cada activitat Industrial i a cada contaminant. Els valors de  $\bar{X}_i^r$  són els de concentracions mitjanes predeterminades per a cada activitat industrial. Els valors del quocient  $C_i^r / \bar{X}_i^r$  es donen en forma d'interval. Un augment en el valor del coeficient implica un augment del grau de sobrecàrrega de contaminants en relació als valors mitjans esperats. Si alguna concentració de contaminant de l'aigua residual industrial retinguda sobrepasa un 112% el seu valor mitjà esperat, el valor del coeficient punta augmenta el cost, en major grau quan major és la sobrecàrrega.

Per tal de garantir el càlcul del coeficient en tots els casos possibles s'han definit dues regles suplementàries de seguretat:

- Si  $\bar{X}_i^r = 0$  i  $C_i^r = 0$ , aleshores  $T_i^r = 1$
- Si  $\bar{X}_i^r = 0$  i  $C_i^r > 0$ , aleshores  $T_i^r = 10$

La lògica d'aquestes regles prové del fet que 1 i 10 són els valors mínim i màxim del coeficient punta respectivament.

Taula 3.3. Valors del coeficient punta

$\frac{C_i^r}{\bar{X}_i^r}$	0 - 1.11	1.12 - 1.25	1.26 - 1.50	1.51 - 1.75	1.76 - 2.00	2.01 - 3.00	3.01 - 4.00	4.01 - 5.00	> 5.00
$T_i^r$	1	1.1	1.2	1.5	1.7	2.0	2.5	3	$\text{mínim} \left\{ \frac{C_i^r}{\bar{X}_i^r}, 10 \right\}$

Font: Generalitat de Catalunya DOGC núm. 4015<sup>40</sup>

c) Un coeficient  $K_i$ , el qual s'assigna a cada activitat industrial, per tal de considerar el grau de saturació de la seva descàrrega  $V_i^j$  en relació amb el volum admissible  $V$  a l'EDAR. El coeficient es defineix emprant una funció contínua creixent per trams amb domini dividit en dos subdominis  $[0, V] = [0, \frac{1}{2}V] \cup [\frac{1}{2}V, V]$ , i rang  $[0, 1]$ , definida de la forma següent:

$$K_i = \frac{V_i^j}{2V} \text{ si } 0 \leq V_i^j \leq \frac{V}{2}, \text{ i } K_i = \frac{3V_i^j}{2V} - \frac{1}{2} \text{ si } \frac{V}{2} < V_i^j \leq V \quad (1)$$

La funció és lineal en cada tram (Fig. 3.10). El pendent del segon tram és major que el del primer, cosa que implica majors augments del valor de  $K_i$  per a volums de descàrrega majors que la meitat de tot el volum admissible a l'EDAR.

S'ha optat per la funció  $K_i$ , definida a l'equació (1), com a solució de compromís entre una funció lineal contínua i una de més complexa. Una funció lineal no permetria el tipus de regulació de grans descàrregues que permet la funció per trams, i una funció més complexa podria introduir una excessiva dificultat en el càlcul en relació a la millora que aportaria al funcionament de l'algorisme per afavorir grans descàrregues. A la Fig. 3.10 es pot observar, amb línia contínua, l'evolució del valor del coeficient tal i com s'ha definit a l'equació (1); per altra banda, la línia discontinua representa un nou coeficient hipotètic definit com una funció lineal de rang  $[0,1]$ . Com es pot observar, usar aquest nou coeficient no beneficiaria la descàrrega de grans volums ( $V_i^j \geq \frac{1}{2}V$ ) de la manera que ho aconsegueix la definició adoptada.

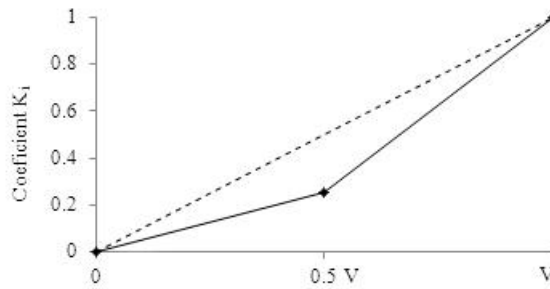


Fig. 3.10. Evolució del valor del coeficient  $K_i$  amb el volum de descàrrega

### *Funció objectiu i restriccions*<sup>23</sup>

Per tal d'obtenir les descàrregues, l'objectiu és maximitzar una funció de cost global, definida com:

$$Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{l_i} y_i^j V_i^j \left( \nu + \psi K_i \sum_{r=1}^5 C_i^r P^r T_i^r \right) \quad (2)$$

on  $y_i^j$  són les variables de decisió binària que prenen un valor igual a 1 si  $Ind_i$  descarrega un volum  $V_i^j$ , i 0 en qualsevol altre cas. El coeficient  $\nu$  és el cost per unitat volumètrica de descàrrega, i el coeficient  $\psi$  és el pes del cost de les càrregues contaminants. L'equació (2)

inclou un primer terme que correspon al cost volumètric, que s'avalua de forma idèntica per a totes les aigües residuals, i un segon terme que correspon al cost específic per a càrregues contaminants, que s'avalua de forma específica per a cada aigua residual, depenent de les característiques de la descàrrega. Els valors seleccionats per als coeficients<sup>96</sup> són  $\nu = 0.1314$ , i  $\psi = 1.5$ .

La funció  $Z$  està restringida per les condicions següents:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{l_i} y_i^j V_i^j \leq V \quad (\text{restricció de volum}) \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{l_i} y_i^j V_i^j C_i^r \leq VC^r, r = 1, \dots, 5 \quad (\text{restriccions de càrregues contaminants}) \quad (4)$$

$$\sum_{j=0}^{l_i} y_i^j = 1, i = 1, \dots, n \quad (\text{restricció de variables de decisió}) \quad (5)$$

Si una solució satisfà totes les restriccions, es considera una solució factible; en qualsevol altre cas, es considera no factible.

### 3.3.3. Algorismes ACO. Propostes $sP$ , $gP$ , $MM$ i $Hc$

Els algorismes ACO, com a instanciacions de la metaheurística, es basen en una colònia de formigues computacionals que presenten un comportament similar al que presenten les colònies de formigues reals, per tal d'obtenir una solució òptima emprant una cerca amb un enfocament constructivista.<sup>97</sup>

Es proposen quatre algorismes ACO:  $sP$  (penalització simple),  $gP$  (penalització global),  $MM$  (Max-Min) i  $Hc$  (Hiper cub). Les quatre versions deriven de  $AS$ , però concretament  $MM$  ho fa de la versió *Max – Min Ant System*<sup>24</sup> i  $Hc$  de la versió *Hypercube*.<sup>25</sup>

### *Antecedents*

Les formigues reals són insectes socials que utilitzen la feromona com a mitjà de comunicació entre elles. Com que són capaces de detectar la feromona, quan en perceben l'olor, en segueixen el rastre. Quan una formiga parteix del formiguer a la cerca de menjar, primer es mou per l'entorn de forma estocàstica. Si fa un recorregut en què troba menjar, quan torna al formiguer dipositarà un rastre de feromona, gràcies al qual altres formigues que sortiran a buscar menjar, tendiran a resseguir el camí de la primera formiga, i si també troben menjar, deixaran més feromona en el mateix trajecte. Com que la tendència de les formigues és seguir els majors cúmuls de feromona, al cap d'un cert temps, hi haurà un gran nombre de formigues al recorregut cap al menjar i cada vegada més formigues seran capaces d'aconseguir-lo.

Les formigues computacionals es poden definir com a agents computacionals simples que treballen cooperativament i es comuniquen mitjançant rastres de feromona artificial<sup>98</sup> per tal d'aconseguir trobar una solució al problema d'optimització combinatoria. Per Dorigo,<sup>97</sup> les bones solucions són propietats emergents de la interacció cooperativa dels agents. Malgrat tot, les formigues computacionals presenten algunes diferències respecte a les formigues reals:<sup>97</sup>

- viuen en un món discret i els seus moviments són transicions d'estats discrets,
- tenen un estat intern, o sigui una certa memòria de les seves accions passades,
- dipositen una quantitat de feromona en funció de la qualitat de la solució trobada,
- la temporització de la seva deposició de feromona depèn del problema,
- les formigues computacionals poden guiar la seva cerca amb l'ajut d'informació heurística específica del problema ,
- una vegada han construït una solució i han dipositat feromona són eliminades del sistema.

A més de l'activitat de les formigues que es mouen per l'espai de cerca de solucions per tal de construir una solució, els algorismes ACO inclouen un procediment d'evaporació del rastre de feromona. La seva finalitat és que els cúmuls de feromona que han estat dipositats en els recorreguts, ja sigui directament en els components<sup>99</sup> o en les connexions entre els

components,<sup>100</sup> vagin decreixent en el temps. Així doncs, l'evaporació de la feromona constitueix una forma d'oblit del passat de les formigues i evita que s'acumuli ràpidament una elevada quantitat de feromona en una regió de l'espai de cerca de solucions que podria provocar la convergència de l'algorisme cap a òptims locals.<sup>91</sup>

El primer algorisme ACO referenciat és *Ant System (AS)*.<sup>93,101,102</sup> Dorigo<sup>93</sup> el va implementar com a mètode d'optimització combinatoria estocàstica per resoldre el problema computacional anomenat del *viatjant de comerç (TSP)* i va avaluar els valors dels paràmetres algorísmics. També va comparar els resultats obtinguts amb els assolits emprant els algorismes *Tabu Search (TS)* i *Simulated Annealing (SA)*. Va concloure que per a un temps d'execució limitat, AS era igual d'efectiu que TS i millor que SA. L'autor va proposar l'aplicació de l'algorisme a d'altres problemes computacionals. A l'algorisme AS se segueix un procediment iteratiu, de forma que s'executen un nombre d'iteracions successives per tal d'obtenir una solució òptima. A cada iteració, les formigues seleccionen els components i construeixen les corresponents connexions del graf a través d'una regla probabilística de decisió anomenada regla de transició d'estat.

AS es va definir en tres versions bàsiques:<sup>102,93</sup> *ant – density*, *ant – quantity* i *ant – cycle*. Bàsicament, difereixen en la manera d'actualitzar el rastre de feromona<sup>97</sup> a mesura que les formigues van movent-se pel graf. Mentre a les dues primeres versions es diposita feromona al mateix temps que les formigues construeixen una solució, a *ant – cycle* es diposita després que totes les formigues que han intervingut en una iteració hagin finalitzat el seu recorregut. Aleshores totes les formigues que han construït una solució dipositen una quantitat de feromona al camí que han seguit, quantitat que és proporcional a la qualitat de la solució construïda. Les versions *ant – density* i *ant – quantity* es van abandonar ràpidament ja que *ant – cycle* oferia millors resultats<sup>93,102</sup>. De fet, *ant – cycle* constitueix la base dels desenvolupaments i millores de posteriors versions algorísmiques, com ara *Max – Min Ant System*<sup>24,103,104</sup> i *Hypercube*.<sup>25,105</sup>

L'algorisme *Max – Min Ant System*<sup>24,104</sup> es va proposar com una versió millorada de l'algorisme AS. Es basa, tal i com descriuen Stützle i Hoos,<sup>24</sup> en considerar clau la combinació d'una cerca exhaustiva a l'entorn de les millors solucions assolides<sup>103</sup> durant la cerca amb un mecanisme d'evitació d'un ràpid estancament. A l'algorisme, després de cada iteració, únicament la formiga que ha aconseguit la millor solució o bé únicament la formiga que ha aconseguit la millor solució global des de l'inici de les iteracions, addiciona feromona. El mecanisme d'evitació de l'estancament consisteix a limitar el rastre de feromona entre un valor



mínim i un de màxim a cada iteració. Per tal d'afavorir una àmplia exploració de l'espai de cerca de solucions és convenient iniciar el funcionament de l'algorisme amb valors de feromona màxims.<sup>24</sup>

L'algorisme *Hypercube*<sup>25,105</sup> es va proposar com a marc que propicia l'anàlisi matemàtica dels algorismes ACO i com a marc comparatiu amb d'altres algorismes evolutius.<sup>25</sup> Blum<sup>105</sup> descriu com l'escala del problema afecta els valors de feromona a l'algorisme AS i conseqüentment el seu funcionament. L'autor<sup>25</sup> considera els valors de feromona com un vector que s'està movent per un hiperespai amb límits diferents per diverses regles d'actualització. En la seva proposta, defineix explícitament els límits de l'hiperespai de valors de feromona com a l'envolupant convexa del conjunt 0-1 de solucions factibles i fa un plantejament de distribució de probabilitats d'acord amb la mitjana ponderada de les solucions. A la proposta, els valors del rastre de feromona es troben sempre a l'interval  $[0,1]$ . A la comparació amb els algorismes evolutius, l'autor coincideix amb Zlochin<sup>88</sup> i presenta un cert avantatge en l'aplicació dels algorismes ACO, cosa que justifica en tant que usen una distribució de probabilitats dels components per a la construcció d'una solució.

No obstant això, l'efecte de l'escala del problema es va matisar a l'anàlisi teòrica de Birattari,<sup>106</sup> el qual va concloure que per a *Ant System* i *Max – Min Ant System*, entre d'altres, la seqüència de solucions no depèn de l'escala del problema.

Gutjahr<sup>107</sup> va demostrar la convergència en valor dels algorismes ACO,<sup>108</sup> definida en termes de tendència a l'obtenció d'una solució òptima. L'autor també va avaluar la probabilitat que un cas particular d'algorisme anomenat *Graph – based Ant System* (GBS) assolís la solució òptima. Així mateix, Dorigo i Stützle<sup>104</sup> també van demostrar la convergència en valor, entre d'altres, de l'algorisme *Max – Min Ant System*. Van determinar que presenta una probabilitat que tendeix a 1 d'assolir una solució òptima quan el nombre d'iteracions és suficientment gran. No obstant això, en un treball de Gutjahr<sup>109</sup> de l'any 2006, la deducció de la velocitat amb què es produeix la convergència constitueix un aspecte que només es referencia en el plantejament de la seva predicció teòrica.

Els algorismes ACO, tal i com va proposar Dorigo,<sup>93</sup> s'han aplicat a la resolució de diferents tipus de problemes d'optimització combinatoria.<sup>92,95</sup> Per al cas concret de l'aplicació al problema de la *motxilla* multidimensional,<sup>74,76,99,110</sup> s'han desenvolupat algorismes basats en AS

que utilitzen diferents models de feromona. A la proposta de Leguizamón i Michalewicz<sup>99</sup> es diposita la feromona sobre els components de la solució i no sobre les connexions dels components. Per la seva banda, Alaya<sup>76</sup> proposa la deposició de feromona en totes les connexions entre cada parell de components que formen part de la solució i, finalment, Fidanova<sup>110</sup> opta perquè es dipositi en el component seleccionat per a la solució i, a més, en el component successiu.

### ***Característiques de les versions algorísmiques sP, gP, MM i Hc***

El plantejament que es realitza en el present treball per a la prioritització dels efluent industrial és diferenciat respecte a les propostes referenciades pel problema genèric multidimensional en els punts següents:

- el graf que representa l'espai de cerca de solucions és bipartit per tal de considerar els dos conjunts de components: activitats industrials i diferents descàrregues volumètriques possibles d'aigua residual (vegeu Fig. 3.11),
- les formigues han de construir connexions entre els dos conjunts del graf, és a dir, entre cada activitat industrial i la descàrrega d'aigua residual que seleccionen d'entre les possibles descàrregues de l'activitat en concret, per construir la seqüència de descàrregues,
- la deposició de la feromona es realitza a les connexions entre els dos conjunts del graf.

Com que el procés d'actualització de feromona és un factor clau del resultat del procediment algorísmic,<sup>24</sup> es plantegen quatre versions algorísmiques: *sP*, *gP*, *MM* i *Hc*, cadascuna amb diferent procediment, per tal de seleccionar la proposta més adequada. L'objectiu és avaluar les solucions construïdes i el tipus de comportament que cal esperar en la selecció de les descàrregues d'aigua residual com a resultat de l'execució algorísmica.

Totes les propostes consten d'una fase principal corresponent a l'algorisme de construcció de la solució i una fase de millora de la solució construïda, composta pels dos algorismes de cerca local.<sup>92,94,111</sup> Els algorismes de cerca local s'han instanciat de manera que en tots els casos la seva funció és millorar la millor solució factible construïda per les formigues a cada iteració.



Aquesta característica es diferencia de la versió AS en què, per a AS, la hibridació amb algorismes de cerca local comporta la millora de totes les solucions construïdes a cada iteració.<sup>94</sup>

La Fig. 3.12 presenta el diagrama de decisió de les quatre propostes algorísmiques que constitueix el detall del bloc *Elaboració d'una solució* de la Fig. 3.9. S'observa a (1) el procediment que segueixen les versions *sP*, *gP* i *Hc*, amb addició de feromona en els trajectes seguits per totes les formigues que han construït una solució en una iteració, i a (2) el procediment que segueix la versió *MM*, amb addició de feromona només al trajecte seguit per la formiga que ha obtingut la millor solució a la iteració, cosa que es referencia<sup>24</sup> com a mètode que ofereix millors resultats que l'addició de feromona només per a la formiga que ha obtingut la millor solució des de l'inici de les iteracions.

Totes les versions disposen d'estratègies que eviten un ràpid estancament de les solucions. L'estancament suposa tenir una elevada quantitat de feromona en una regió de l'espai de cerca de solucions en què es concentrarà un elevat nombre de formigues a les primeres iteracions, amb la qual cosa ràpidament assoliran una solució deixant moltes altres zones sense explorar. La construcció de la solució a les primeres iteracions pot comportar que la solució assolida no sigui de bona qualitat. Tant els algorismes de cerca local, com la informació heurística, com les regles d'actualització de feromona de les versions proposades pretenen evitar-ho.

A les versions *sP* i *gP* s'han implementat penalitzacions, com a mètode de gestió de restriccions,<sup>112</sup> al procediment d'actualització de la feromona. Les penalitzacions són una forma de poder tractar com a no-restringit un problema que originalment ho és. Es referencien<sup>113,100</sup> aplicacions de penalitzacions a algorismes ACO. Sense utilitzar-los, quan una formiga, en el seu recorregut per l'espai de cerca de solucions, obté una solució no factible no diposita nova feromona en el trajecte que ha seguit, de manera que, en aquest, o no hi ha rastre de feromona o, el que hi ha d'anteriors iteracions es va evaporant i esdevé poc intens. En no disposar o disposar de poca quantitat de feromona en aquestes connexions, és a dir, en aquestes arestes del graf, les formigues de les noves iteracions no tendiran a dirigir-se cap aquesta regió que els hi resultarà poc atractiu; per tant, en el transcurs de diverses iteracions hi haurà una regió que no s'explorarà. Amb la incorporació de penalitzacions a la regla d'actualització de feromona, s'aconsegueix que es dipositi una certa quantitat de feromona, que és funció del grau de violació de la restricció (o restriccions), en el trajecte d'una solució no factible, amb la qual cosa

s'afavoreix l'expansió de l'exploració de les formigues cap a més regions del seu espai de cerca de solucions; per tant, augmenten les probabilitats d'assolir una bona solució.<sup>114</sup>

S'han implementat dos tipus de penalitzacions. Una penalització simple a la versió *sP*, que està relacionada amb el volum total de les descàrregues de la solució trobada i en la mesura en què aquesta solució s'allunya de la millor solució aconseguida a la iteració. Una penalització global amb múltiples factors a la versió *gP*, que estan relacionats amb el volum i les càrregues totals de contaminants de les descàrregues de la solució trobada i en la mesura en què aquesta solució s'allunya de la millor solució que s'ha aconseguit a la iteració.

A les versions *MM* i *Hc* s'han implementat límits per als valors dels rastres de feromona, els quals es mouen entre un valor màxim i un de mínim, i entre 1 i 0, respectivament. En limitar el valor de la feromona, les diferències entre els cúmuls de feromona dels diferents trajectes evolucionen lentament, de manera que s'afavoreix una major exploració en la cerca de solucions a través de l'espai de cerca de solucions.

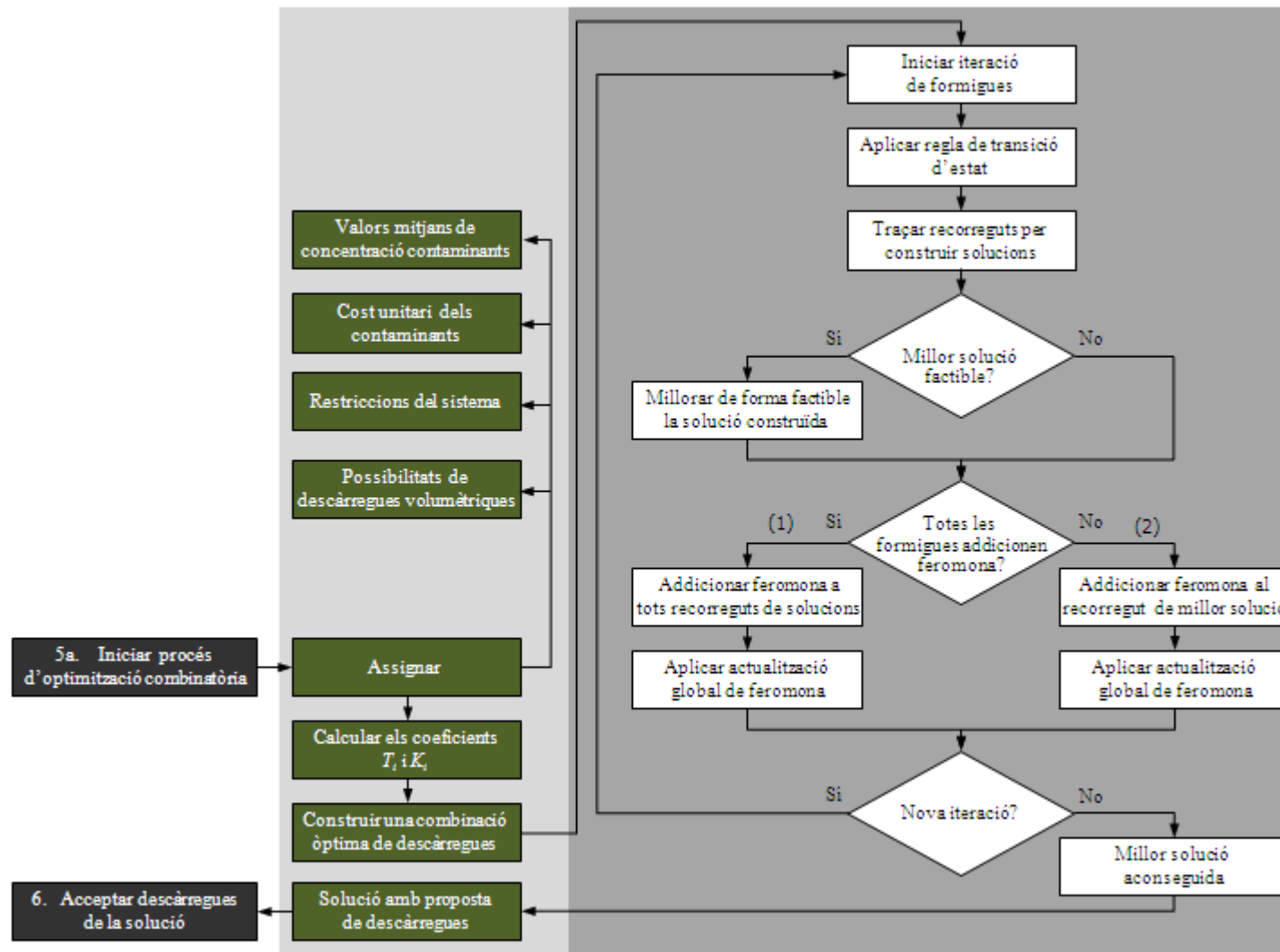


Fig. 3.12. Diagrama del procés de prioritització d'efluents industrials amb els itineraris (1) de les versions  $sP$ ,  $gP$  i  $Hc$ , i (2) de  $MM$

### 3.3.3.1. Fase de construcció de solucions

Cada versió algorísmica utilitza una població de  $M$  formigues, cadascuna de les quals està localitzada inicialment en una posició a l'atzar. Cada formiga construeix una solució aplicant una regla probabilística per passar d'un estat a un altre en el seu recorregut per l'espai de cerca de solucions. L'espai de cerca de solucions es representa amb un graf bipartit  $G = (N, E)$ , on  $N = \{Ind_i\} \cup \{V_i^j\}$  és el conjunt de nodes, i  $E$  és el conjunt d'arestes. L'aresta  $(i, j)$  representa que la  $Ind_i$  descarrega  $V_i^j$ .

#### *Regla de transició d'estat*

La regla de transició està definida per l'equació,<sup>92,93,101,102</sup>

$$p_{ij}^m(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{m=1}^M [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta} \quad (6)$$

on  $p_{ij}^m(t)$  és la probabilitat de que la formiga  $m^{ésima}$  esculli el volum de descàrrega  $V_i^j$ ,  $\tau_{ij}(t)$  és el rastre de feromona en el temps  $t$ ,  $\alpha$  és la importància de la feromona,  $\eta_{ij}$  és la informació heurística específica, i  $\beta$  és la importància de la informació heurística.

Com que la informació heurística és un ajut addicional per guiar les formigues en la cerca d'una solució, s'ha considerat que en el procés de prioritització ha de beneficiar la tendència a incloure en la solució les descàrregues provinents de volums i càrregues contaminants elevats i amb una major urgència relativa, raó per la qual l'equació heurística pren la forma:

$$\eta_{ij} = V_i^j \sum_{r=1}^5 w^r C_i^r T_i^r \quad (7)$$

a partir de la qual, la regla de transició queda especificada com

$$p_{ij}^m(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \left[ V_i^j \sum_{r=1}^5 w^r C_i^r T_i^r \right]^\beta}{\sum_{m=1}^M [\tau_{ij}(t)]^\alpha \left[ V_i^j \sum_{r=1}^5 w^r C_i^r T_i^r \right]^\beta} \quad (8)$$

El valor del rastre de feromona  $\tau_{ij}(t)$  depèn de la regla d'actualització del rastre de feromona i constitueix un factor clau del resultat del procediment algorísmic.<sup>24</sup>

### *Actualització de feromona amb ús de penalitzacions<sup>23</sup>*

En les versions algorísmiques  $sP$  i  $gP$ , en finalitzar cada iteració, totes les formigues que han participat en la cerca d'una solució i han completat un camí, actualitzen el seu rastre de feromona amb un increment que és funció de la qualitat de la solució construïda. Es disposen les quantitats més elevades a les arestes que han estat seleccionades per a la construcció d'una solució factible, i les menors, en les que formen part d'una solució no factible.

Considerant l'aresta  $(i, j)$  en la qual a l'inici de la iteració realitzada a temps  $t$  es disposava d'un rastre de feromona  $\tau_{ij}(t)$ , el cúmul de feromona actualitzat a temps  $t+1$  s'estableix en l'equació

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t) \quad (9)$$

on  $0 \leq \rho \leq 1$  és un coeficient per a l'evaporació de la feromona, de forma que  $1 - \rho$  representa el grau d'evaporació del rastre. La nova feromona que s'addiciona és

$$\Delta \tau_{ij}(t) = \sum_{m=1}^M \Delta \tau_{ij}^m(t) \quad (10)$$



amb

$$\Delta \tau_{ij}^m = \begin{cases} Q Z_m \text{ penalització}_m & \text{si la formiga } m^{\text{èsima}} \text{ ha seleccionat l'aresta } (i, j) \\ 0 & \text{en qualsevol altre cas} \end{cases} \quad (11)$$

on  $Q$  és un número positiu,  $Z_m$ , la solució obtinguda per la formiga  $m^{\text{èsima}}$  en el seu recorregut, i  $\text{penalització}_m$ , un valor que varia segons si la versió algorísmica és  $sP$  o  $gP$ .

a) *Penalització<sub>m</sub> en la versió algorísmica sP*

*Penalització<sub>m</sub>* és una penalització simple relacionada amb el volum total de descàrrega segons l'expressió

$$\text{penalització}_m = \begin{cases} \left( \frac{V}{TV_m} \right)^a & \text{si } V < TV_m \\ \left( \frac{Z_m}{Z^*} \right)^b & \text{si } V \geq TV_m \end{cases} \quad (12)$$

on  $TV_m = \sum_{i=1}^n V_{i,m}$  és el volum total d'influent rebut per l'EDAR en el trajecte de la formiga  $m^{\text{èsima}}$ ,  $a$  és la importància relacionada amb el fet de tenir un volum total en el trajecte que excedeix el volum  $V$  admissible a l'EDAR,  $Z^*$  és la millor solució obtinguda a la iteració, i  $b$  és la importància relacionada amb el valor del quocient entre les solucions obtinguda i millor.

A la versió  $sP$ , es generen petits cúmuls de feromona quan  $TV_m$  excedeix  $V$ , i quan el valor de  $Z_m$  és distant respecte del de  $Z^*$ .

b) *Penalització<sub>m</sub> en la versió algorísmica gP*

*Penalització<sub>m</sub>* és una penalització global amb múltiples factors relacionats amb el volum i cadascuna de les càrregues de contaminants.

$$penalització_m = \begin{cases} \left( \frac{V}{TV_m} \right)^a \left( \frac{Lo^1}{Lo_m^1} \right)^{a_1} \left( \frac{Lo^2}{Lo_m^2} \right)^{a_2} \left( \frac{Lo^3}{Lo_m^3} \right)^{a_3} \left( \frac{Lo^4}{Lo_m^4} \right)^{a_4} \left( \frac{Lo^5}{Lo_m^5} \right)^{a_5} & \text{si } V < TV_m, \text{ o } Lo^r < Lo_m^r \\ & \text{per a algun } r = 1, \dots, 5 \\ \left( \frac{Z_m}{Z^*} \right)^b & \text{si } V \geq TV_m, \text{ i } Lo^r \geq Lo_m^r \\ & \text{per a tots els } r = 1, \dots, 5 \end{cases} \quad (13)$$

on

si  $Lo^r < Lo_m^r$ , aleshores  $a_r = 2$ ; en qualsevol altre cas,  $a_r = 0, r = 1, \dots, 5$

si  $V < TV_m$ , aleshores  $a = 2$ ; en qualsevol altre cas,  $a = 0$

i on  $Lo^r = VC^r$  són les càrregues admissibles de contaminants a l'EDAR,  $Lo_m^r = \sum_{i=1}^n C_i^r V_{i,m}$ ,

les càrregues de contaminants  $x_r$  assolides en el trajecte de la formiga  $m^{èsima}$ , i  $a_r$ , la importància que els valors de les càrregues contaminants obtingudes en el trajecte excedeixin els seus corresponents valors d'admissió a l'EDAR.

A la versió *gP* es generen petits cúmuls de feromona quan  $TV_m$  excedeix  $V$ , quan algun (o diversos)  $Lo_m^r$  excedeix  $Lo^r$ , i quan el valor de  $Z_m$  és distant respecte del de  $Z^*$ .

***Actualització de feromona amb ús de valors límit***

En les versions *MM* i *Hc*, els rastres de feromona a cada iteració presenten valors dins rangs específics.<sup>24,25</sup>

a) Regla d'actualització en la versió MM

L'algorisme MM únicament addiciona nova feromona a la formiga que ha construït la millor solució en cada iteració.

Considerant l'aresta  $(i, j)$  en la qual a l'inici de la iteració finalitzada es disposava d'un rastre de feromona  $\tau_{ij}(t)$ , per a una nova iteració a temps  $t + 1$  es disposa d'una quantitat de feromona que estableix l'equació<sup>24</sup>

$$\tau_{ij}(t + 1) = \rho \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}^{best} \quad (14)$$

on  $\Delta \tau_{ij}^{best}$  és la feromona generada per la formiga que ha assolit la millor solució  $Z^*$  a la iteració finalitzada, amb un valor

$$\Delta \tau_{ij}^{best} = Z^* \quad (15)$$

A qualsevol iteració de l'algorisme s'ha de complir que tots els rastres de feromona tinguin un valor  $\tau_{ij}(t)$  tal que  $\tau_{\min} \leq \tau_{ij}(t) \leq \tau_{\max}$ , per tant, s'estableixen dues regles addicionals

- si  $\tau_{ij}(t) > \tau_{\max}$ , aleshores assigna  $\tau_{ij}(t) = \tau_{\max}$
- si  $\tau_{ij}(t) < \tau_{\min}$ , aleshores assigna  $\tau_{ij}(t) = \tau_{\min}$

Valors límit  $\tau_{\max}$  i  $\tau_{\min}$

Els valors màxim i mínim de feromona que defineixen l'interval de valors on es troba el rastre de feromona a cada iteració es determinen d'acord amb els criteris següents:<sup>24</sup>

- considerar que la principal influència en la construcció d'una solució és la relació entre els límits superior i inferior del rastre de feromona,

- considerar que la millor solució es troba quan l'algorisme convergeix<sup>104</sup> o està molt proper a fer-ho, i en aquesta situació la probabilitat que es construeixi la millor solució en una iteració és significativament més gran que 0,

- no considerar la informació heurística, per tal de simplificar la determinació.

Adaptant les equacions de Stützle i Hoos,<sup>24</sup> el rastre de feromona màxim per al problema objecte d'estudi s'obté de l'equació

$$\tau_{\max} = \frac{1}{1-\rho} Z^* \quad (16)$$

considerant que la millor solució està construïda amb un recorregut de  $\tau_{\max}$ , es defineix  $p_{best}$  com la probabilitat de construir aquesta solució i  $p_{dec}$  com la probabilitat que la formiga  $m^{èsima}$  seleccioni una descàrrega d'aigua residual corresponent a una aresta amb  $\tau_{\max}$ . A la construcció de la millor solució, la formiga  $m^{èsima}$  ha de seleccionar  $n$  vegades arestes amb una quantitat de feromona  $\tau_{\max}$ , amb la qual cosa

$$p_{dec}^n = p_{best} \quad (17)$$

A cada selecció de descàrrega, la formiga disposa d'un nombre mitjà  $avg$  de possibilitats de descàrrega

$$avg = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (l_i + 1) \quad (18)$$

quan selecciona una descàrrega amb un valor de feromona  $\tau_{\max}$ , no escull entre les altres  $avg - 1$  possibilitats de descàrrega que corresponen a arestes amb  $\tau_{\min}$ , de manera que

$$p_{dec} = \frac{\tau_{\max}}{\sum_{i=1}^n \tau_{ij}(t)} = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{\max} + (avg - 1)\tau_{\min}} \quad (19)$$

i el valor  $\tau_{\min}$  a cada iteració és

$$\tau_{\min} = \frac{\tau_{\max}(1 - p_{dec})}{(avg - 1)p_{dec}} = \frac{\tau_{\max}(1 - \sqrt[n]{p_{best}})}{(avg - 1)\sqrt[n]{p_{best}}} \quad (20)$$

b) *Regla d'actualització en la versió Hc*<sup>25,105</sup>

En la versió *Hc*, els rastres de feromona es limiten a valors de l'interval  $[0,1]$ . Per aconseguir-ho, es modifica la regla d'actualització de feromona que deriva de AS amb un increment de feromona normalitzat que es multiplica pel grau d'evaporació  $1 - \rho$ .

Considerant l'aresta  $(i, j)$  en la qual a l'inici de la iteració realitzada a temps  $t$  es disposava d'un rastre de feromona  $\tau_{ij}(t)$ , la quantitat de feromona actualitzada a temps  $t + 1$  és

$$\tau_{ij}(t + 1) = \rho\tau_{ij}(t) + (1 - \rho)\Delta\tau_{ij}(t) \quad (21)$$

L'increment de feromona  $\Delta\tau_{ij}(t)$  es defineix com un valor dependent de les  $M$  formigues que han utilitzat l'aresta en el seu recorregut

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{m=1}^M \Delta\tau_{ij}^m \quad (22)$$

on  $\Delta\tau_{ij}^m$  és la quantitat de feromona addicionada per la formiga  $m^{\text{èsima}}$  i es defineix en la forma

$$\Delta\tau_{ij}^m = \begin{cases} \frac{Z_m}{\sum_{m=1}^M Z_m} & \text{si } Z_m \in Z_{ij} \\ 0 & \text{en qualsevol altre cas} \end{cases} \quad (23)$$

amb  $Z_m$  que representa la solució de cost construïda per la formiga  $m^{\text{èsima}}$  i  $Z_{ij}$ , el conjunt de totes les solucions factibles construïdes per la població de les  $M$  formigues.

### 3.3.3.2. Fase de millora de la solució construïda

La millor solució de cada iteració  $Z^*$  es processa utilitzant dos algorismes de millora local<sup>94</sup>.

El primer algorisme té com a objectiu la millora de  $Z^*$  mitjançant descàrregues parcials de l'aigua residual encara retinguda als dipòsits de retenció  $\sum_{i=1}^n L_i - V_i^*$ , on  $V_i^*$  és el volum de descàrrega de  $Ind_i$  a la solució construïda.<sup>23</sup> Si un nou volum de descàrrega proporciona una millora a una solució factible, creant una nova solució factible, aquest nou volum s'addiciona i es considera la nova solució factible; en un altre cas, el nou volum no s'addiciona i la nova solució no es considera. Quan s'aconsegueix la millor solució factible  $Z^{**}$ , aquesta substitueix l'anterior.

El segon algorisme millora el valor de  $Z^{**}$  a través de la cerca en el veïnatge de la solució. Interpretant una solució com un vector de  $n$  descàrregues, l'algorisme realitza un augment en un component de la solució, un decreixement en un altre i no canvia la resta de components,<sup>23</sup> és a dir, les descàrregues poden augmentar o disminuir al nivell de descàrrega següent. Considerant, tal i com s'ha especificat en el plantejament del problema, les possibles descàrregues volumètriques  $V_i^j$ ,  $j \in \{0, \dots, l_i\}$ , amb  $100j = V_i^j$  i  $100l_i = L_i$ , el nivell següent de descàrrega correspon a  $\pm 100$ . El veïnatge de la solució té un cardinal de  $n(n-1)$  possibles solucions, que correspon a 600 possibles noves solucions per a  $n = 25$ . Com a exemple, si el problema es planteja únicament per a quatre activitats industrials amb una solució assolida  $S = (e, j, k, l)$ , és a dir, amb l'activitat 1 que inicialment descarrega un volum  $e$  d'aigua residual, l'activitat 2 que en descarrega  $j$ , l'activitat 3,  $k$ , i l'activitat 4,  $l$ , el segon algorisme avaluarà les solucions següents

$$\left\{ \begin{array}{l} (e+1, j-1, k, l), (e+1, j, k-1, l), (e+1, j, k, l-1), (e-1, j+1, k, l), \\ (e-1, j, k+1, l), (e-1, j, k, l+1), (e, j+1, k-1, l), (e, j+1, k, l-1), \\ (e, j-1, k+1, l), (e, j-1, k, l+1), (e, j, k+1, l-1), (e, j, k-1, l-1) \end{array} \right\}$$

Si un canvi en un component del seu veïnatge millora una solució factible i en resulta una nova solució factible, aquest nou component s'inclourà en la solució en comptes de l'anterior component, i, per tant, es considerarà la nova solució factible; si no és el cas, el nou component

no s'inclourà ni es considerarà la nova solució. Quan s'assoleix la millor solució  $Z$ , aquesta substitueix l'anterior.<sup>23</sup>

## Capítol 4

# Resultats i discussió

### 4.1. Priorització dels efluentis industrials

El protocol seguit per tal de realitzar simulacions que permetin observar el comportament de les quatre propostes algorísmiques:  $sP$ ,  $gP$ ,  $MM$  i  $Hc$  es presenta a la Fig. 4.1. Les línies discontinues de la figura relacionen les diferents etapes amb el cas d'estudi de referència i els escenaris alternatius.

En primer lloc, es defineixen les característiques del sistema, a continuació, el procediment de calibratge dels algorismes, amb dues alternatives: la (1) correspon a les versions  $sP$  i  $gP$ ,<sup>23</sup> i la (2), a les versions  $MM$  i  $Hc$ . La diferència entre ambdues recau en l'avaluació dels paràmetres de penalització  $a$  i  $b$ , que s'han de calibrar únicament per a les versions  $sP$  i  $gP$ , així com el número  $Q$ . En tercer lloc, s'executen les simulacions de les versions algorísmiques calibrades en tots els escenaris, i, finalment, es comparen i discuteixen els resultats obtinguts.



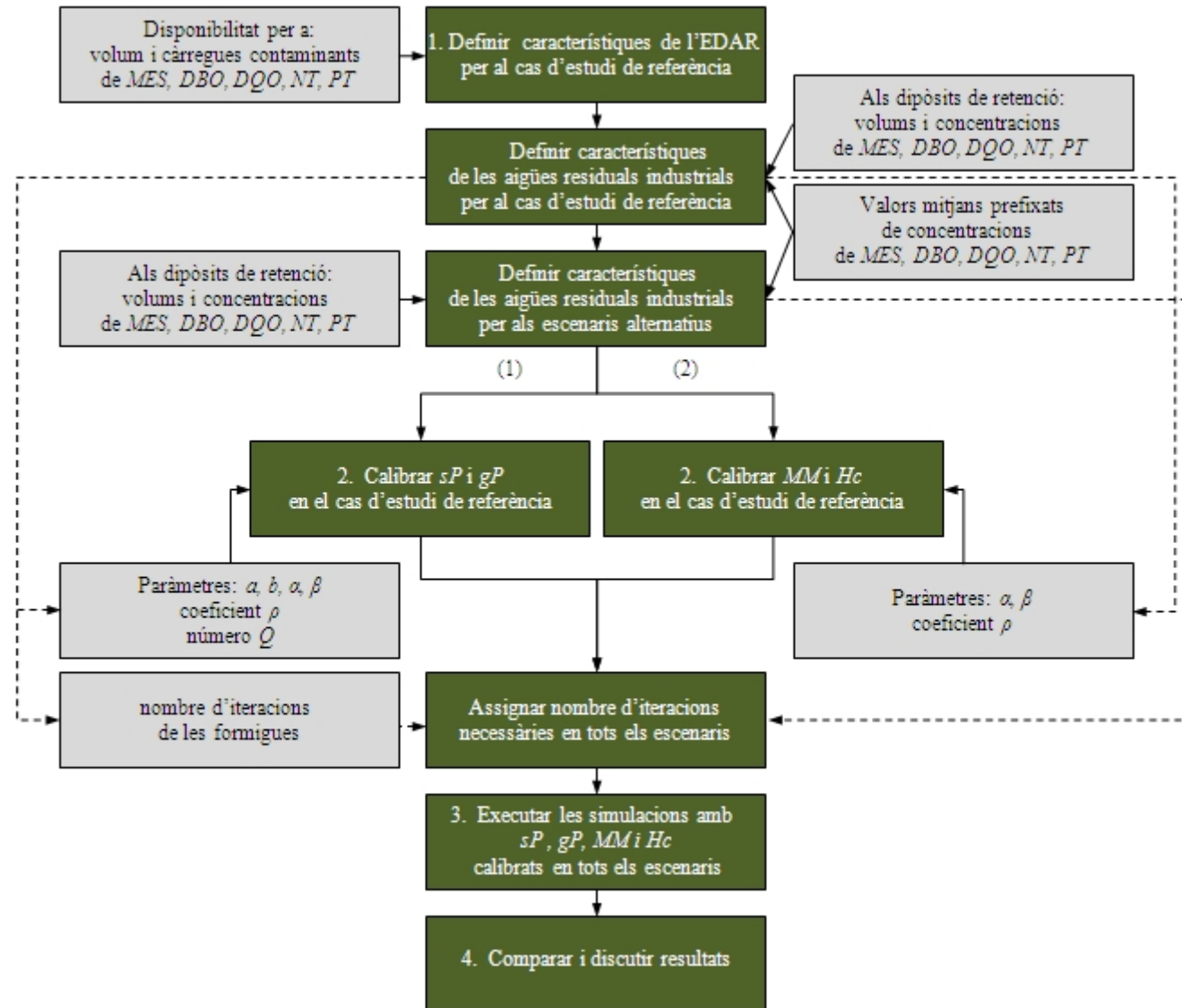


Figura 4.1. Protocol per a la realització de les simulacions

### 4.1.1. Definició d'escenaris

#### *Cas d'estudi de referència*<sup>23</sup>

El cas d'estudi de referència (Taula 4.1), també anomenat escenari 1, consisteix en una EDAR i un conjunt de 25 activitats industrials que generen aigües residuals amb diferents composicions, les quals estan definides pel conjunt de contaminants  $x_r, r=1, \dots, 5$ . Per a cada activitat, s'ha definit el conjunt preestablert de valors mitjans de concentracions  $\bar{X}_i^r$  pels contaminants  $x_r$ , els quals corresponen als valors esperats en el decurs d'un funcionament normal. També s'han definit, per a cada activitat, els valors corresponents a les dades rebudes de previsió d'aportacions al cycle de coordinació, les quals corresponen a la previsió de volum d'aigua residual retinguda  $L_i$  i a les seves concentracions de contaminants  $C_i^r, r=1, \dots, 5$ . Els valors  $\bar{X}_i^r, L_i$  i  $C_i^r$  de l'escenari 1 estan basats en dades corresponents a algunes sortides d'aigües residuals d'activitats industrials de la regió.

Els valors absoluts de les diferències entre els valors de  $C_i^r$  i les seves corresponents concentracions preestablertes  $\bar{X}_i^r$  estan representats per  $\bar{D}_i^r$  (Taula 4.2). Els valors que presenten un coeficient punta major que 1 representen el 17.6% dels valors de concentracions de contaminants.

#### *Escenaris alternatius*<sup>23</sup>

Per tal de poder analitzar el comportament de les propostes algorísmiques sota diferents condicions, s'han considerat els escenaris 2 i 3 (detallats a l'Annex I).

L'escenari 2 inclou els mateixos valors per  $L_i$  que l'escenari 1. Difereix de l'escenari 1 en tenir valors més elevats de  $C_i^r$  i  $\bar{D}_i^r$ , i majors càrregues contaminants  $\sum_{i=1}^n L_i C_i^r$  (vegeu Taula 4.2). A més, el 75.2% de les concentracions de contaminants presenten coeficients punta majors que 1.

Taula 4.1. Dades corresponents a les activitats industrials i a l'EDAR en l'escenari de referència

ACTIVITATS INDUSTRIALS											
$i$	$\bar{X}_i^r$ (g/m <sup>3</sup> )					$C_i^r$ (g/m <sup>3</sup> )					$L_i$ (m <sup>3</sup> )
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	
1	200	150	1010	19	9	157	210	870	9	1	100
2	300	350	500	25	13	300	200	300	10	9	200
3	500	100	850	5	0	450	100	1050	5	0	500
4	750	500	850	40	0	650	500	950	30	0	2000
5	650	750	800	90	10	650	550	650	90	10	200
6	100	700	800	20	0	100	700	900	10	0	700
7	650	750	800	35	15	570	600	760	35	12	500
8	610	100	740	0	0	670	100	850	0	0	200
9	50	20	200	2	0	40	20	150	2	0	300
10	167	171	433	2	1	600	320	490	2	1	200
11	64	249	623	40	4	40	270	620	43	6	3000
12	300	415	670	5	1	550	495	570	13	2	400
13	950	188	375	12	4	125	135	520	4	1	300
14	350	200	500	15	2	375	180	340	7	0	100
15	180	95	810	30	1	200	550	800	23	4	700
16	300	800	940	35	6	150	350	540	38	2	2000
17	760	620	1150	5	0	260	420	550	15	0	500
18	160	360	580	90	7	180	310	480	40	5	500
19	565	690	950	20	1	365	390	550	10	2	100
20	600	750	800	10	15	500	500	700	2	10	100
21	600	750	800	10	15	612	450	680	10	0	500
22	700	1300	2325	20	10	498	700	810	50	12	100
23	500	600	950	50	15	506	670	820	50	5	400
24	500	800	1000	50	15	226	850	930	10	2	100
25	300	400	650	20	0	180	350	550	30	18	1000
EDAR											
						$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$V$ (m <sup>3</sup> )
	$w^r$ (*)					0.08	0.11	0.11	0.10	0.10	
	$P^r$ (**)	(€/Kg)				0.3980	0.5000	1.1945	0.6145	1.2092	12000
	$VC^r$	(Kg)				8400	7800	8400	1200	240	

(\*) Valors basats en els factors de pes de la *National Sanitation Foundation Water Quality Index*

(\*\*) Valors basats en el DOGC 5288<sup>96</sup>

Taula 4.2. Característiques de les aigües residuals industrials en els escenaris 1, 2 i 3

		Escenari 1		Escenari 2		Escenari 3		
(1)		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	
$L_i$	$\sum_{i=1}^n L_i$ (m <sup>3</sup> )	$\sum_{i=1}^n L_i$ en relació a $V$ (%)	14700	122.5	14700	122.5	25000	208.3
	$\bar{L}_i$ (m <sup>3</sup> )	$\sigma_L$	588	716.08	588	716.08	1000	0
$x_1$	$\sum_{i=1}^n L_i C_i^1$ (Kg)	$\sum_{i=1}^n L_i C_i^1$ en relació a $VC^1$ (%)	4274	50.9	8548	101.8	8954	106.6
	$\bar{C}^1$ (g/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{C^1}$	358.16	211.02	716.32	422.04	358.16	211.02
	$\bar{T}^1$	$\sigma_{T^1}$	1.09	0.32	1.79	1.18	1.09	0.32
	$\bar{D}^1$	$\sigma_{D^1}$	140.16	195.67	363.12	282.19	140.16	195.67
$x_2$	$\sum_{i=1}^n L_i C_i^2$ (Kg)	$\sum_{i=1}^n L_i C_i^2$ en relació a $VC^2$ (%)	5704.5	73.1	11409	146.3	9920	127.2
	$\bar{C}^2$ (g/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{C^2}$	396.80	216.77	793.60	433.53	396.80	216.77
	$\bar{T}^2$	$\sigma_{T^2}$	1.24	0.96	1.89	1.73	1.24	0.96
	$\bar{D}^2$	$\sigma_{D^2}$	146.32	164.57	329.28	274.20	146.32	164.57
$x_3$	$\sum_{i=1}^n L_i C_i^3$ (Kg)	$\sum_{i=1}^n L_i C_i^3$ en relació a $VC^3$ (%)	9975	118.7	19950	237.5	16430	195.6
	$\bar{C}^3$ (g/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{C^3}$	657.20	219.84	1314.40	439.68	657.20	219.84
	$\bar{T}^3$	$\sigma_{T^3}$	1.02	0.05	1.54	0.34	1.02	0.05
	$\bar{D}^3$	$\sigma_{D^3}$	204.00	304.09	570.56	325.75	204.00	304.09
$x_4$	$\sum_{i=1}^n L_i C_i^4$ (Kg)	$\sum_{i=1}^n L_i C_i^4$ en relació a $VC^4$ (%)	426.8	35.6	853.6	71.1	538	44.8
	$\bar{C}^4$ (g/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{C^4}$	21.52	21.45	43.04	42.91	21.52	21.45
	$\bar{T}^4$	$\sigma_{T^4}$	1.13	0.33	1.79	1.25	1.13	0.33
	$\bar{D}^4$	$\sigma_{D^4}$	9.60	12.66	21.60	24.91	9.60	12.66
$x_5$	$\sum_{i=1}^n L_i C_i^5$ (Kg)	$\sum_{i=1}^n L_i C_i^5$ en relació a $VC^5$ (%)	61.1	25.5	122.2	50.9	102	42.5
	$\bar{C}^5$ (g/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{C^5}$	4.08	4.99	8.16	9.98	4.08	4.99
	$\bar{T}^5$	$\sigma_{T^5}$	1.48	1.81	1.94	2.20	1.48	1.81
	$\bar{D}^5$	$\sigma_{D^5}$	3.84	5.06	5.92	7.69	3.84	5.06

L'escenari 3 té els mateixos valors de concentracions de contaminants  $C_i^r$  que l'escenari 1; per tant, ambdós escenaris presenten els mateixos valors de desviacions estàndard,  $\bar{D}_i^r$  i coeficients punta.

Per altra banda, l'escenari 3 es diferencia de l'escenari 1 perquè presenta un major volum global d'aigua residual retinguda, implicant majors valors de càrregues contaminants globals retingudes (vegeu Taula 4.2). Totes les activitats industrials tenen el mateix valor per als volums d'aigua retinguts:  $L_i = 1000$ .

#### 4.1.2. Procés de calibratge

Abans d'aplicar cada versió algorísmica per a construir una solució òptima, és necessari calibrar els valors dels paràmetres algorísmics<sup>93,94</sup> de les versions proposades. Els valors emprats han estat els més referenciats a la bibliografia.

##### *Versions algorísmiques sP i gP*<sup>23</sup>

El procediment de calibratge ha seguit l'estratègia de referència.<sup>93,100</sup> Tots els assaigs han estat realitzats amb 500 iteracions i 100 formigues per iteració, i els resultats amitjanats sobre 10 repeticions. La primera iteració de cada repetició s'ha iniciat amb el mateix valor ( $\tau_0 = 100$ ) de rastre de feromona a totes les arestes per tal que totes presentin la mateixa probabilitat d'ésser escollides per les formigues.

A la primera etapa, es calibren els valors de  $a, b$  (eq. 12 i 13),  $\alpha$  i  $\beta$  (eq. 8) emprant un procediment combinatori dels valors de referència<sup>93</sup>  $a = 2, b \in \{2, 8\}, \alpha \in \{0, 0.2, 0.5, 1, 2, 5\}$  i  $\beta \in \{0, 0.2, 0.5, 1, 2, 5\}$ , i constants<sup>100</sup>  $\rho = 0.99$  i  $Q = 1000$ . Per a la versió  $gP$ , s'afegeixen els valors pels paràmetres  $a_1, \dots, a_5 = 2$  (eq. 13).

A la segona etapa, es calibren els valors de  $\rho$  (eq. 9) i  $Q$  (eq.11) individualment, amb els valors de referència<sup>93</sup>  $\rho \in \{0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 0.99\}$  i  $Q \in \{100, 500, 1000, 5000\}$ , i els valors de  $a, b, \alpha$  i  $\beta$ , que han obtingut la millor solució a la primera etapa, com a constants.

Així mateix, es determina el nombre d'iteracions de les formigues necessari per aconseguir una solució estable, de manera que es troben iterativament les millors solucions emprant els valors de  $a, b, \alpha, \beta, \rho$  i  $Q$ , que prèviament han obtingut la millor solució, com a constants. Aquest procés es repeteix en els escenaris 2 i 3.

Els valors dels paràmetres que han obtingut les millors solucions mitjanes són els següents:

a) *Per a la versió sP*,

$a=2, b=2, \alpha=1, \beta=0, \rho=0.9$  i  $Q=1000$ , amb una solució de cost  $\bar{Z}=3002.86, \sigma_Z=5.91$  i una  $Z_{\max}=3011.84$ .

b) *Per a la versió gP*,

$a=2, a_r=2, b=2, \alpha=1, \beta=0.2, \rho=0.9$  i  $Q=1000$ , amb una solució de cost  $\bar{Z}=3007.56, \sigma_Z=8.61$  i una  $Z_{\max}=3016.52$ .

El valor obtingut per a la importància de la informació heurística  $\beta=0$ , a la versió sP, indica que a la regla de transició d'estat (eq. 8) únicament es considera el valor de la feromona. El valor obtingut per a la importància de la feromona ha estat  $\alpha=1$ , raó per la qual el valor de la probabilitat que la formiga  $m^{\text{èsima}}$  seleccioni el volum  $V_i^j$  (eq. 8) depèn dels valors del procés emprat per actualitzar el rastre de feromona (eq. 9). Utilitzant un procediment de penalització simple (eq. 12), els valors de la penalització aconseguida amb els valors dels paràmetres  $a=2$  i  $b=2$  resulten avantatjosos per a la cerca d'una solució a causa dels cúmuls de feromona que es generen a les arestes. Per altra banda, amb l'addició dels algorismes de cerca local, la informació heurística no resulta necessària per guiar les formigues en la construcció d'una bona solució<sup>94</sup>.

El valor  $\beta=0.2$ , obtingut en la versió gP, presenta un lleuger increment respecte a l'obtingut emprant una penalització simple. Per a la regla de transició d'estat (eq. 8) amb  $\alpha=1$ , el valor

de  $\beta$  compensa, en certa mesura, el decrement en la tendència a descarregar les majors càrregues contaminants, arran dels múltiples factors que afecten els valors de la penalització (eq.13) amb  $a = 2$ ,  $a_r = 2$  i  $b = 2$ , i consegüentment, el valor del rastre de feromona.

Per a ambdues versions,  $sP$  i  $gP$ , tal i com s'observa a la Fig. 4.2, els millors valors de  $\bar{Z}$  es van aconseguir emprant  $\rho = 0.9$ , és a dir, amb un grau d'evaporació de 0.1.

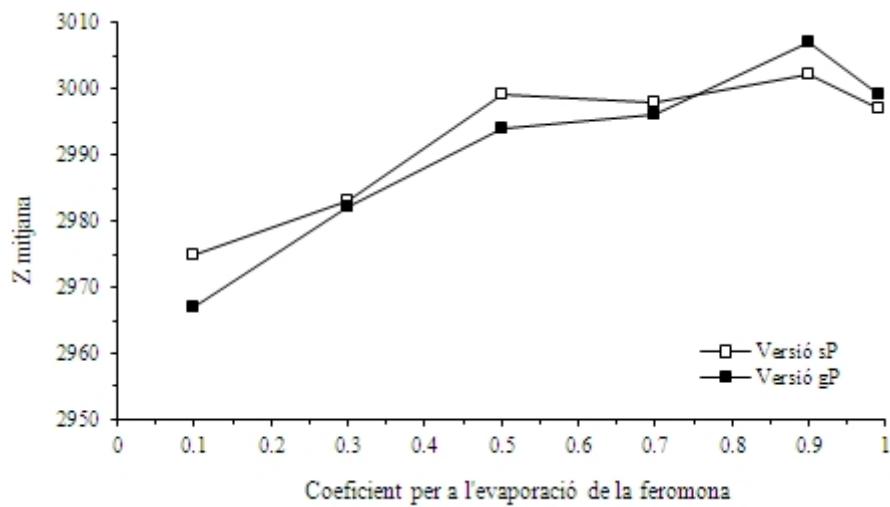


Fig. 4.2. Resultats de  $\bar{Z}$  obtinguts amb els valors de  $\rho$  provats per a  $sP$  i  $gP$

Els valors provats per al número  $Q$  presenten poques diferències en relació a les solucions obtingudes. L'execució mitjançant la versió  $sP$  aconsegueix solucions que estan en el rang de  $\bar{Z} = 3002.02$  amb  $\sigma_Z = 7.25$  a  $\bar{Z} = 3004.01$  amb  $\sigma_Z = 7.52$ , i mitjançant la versió  $gP$ , de  $\bar{Z} = 3002.94$  amb  $\sigma_Z = 8.36$  a  $\bar{Z} = 3005.61$  amb  $\sigma_Z = 10.17$ .

Les millors solucions que s'han aconseguit iterativament utilitzant una penalització simple presenten una petita millora després de 100 iteracions en els escenaris 1 i 3, i després de 150 iteracions en l'escenari 2, tal i com s'observa a la Fig. 4.3. A l'escenari 1, l'evolució de les millors solucions aconseguides, utilitzant una penalització global (Fig. 4.4), és similar a l'observat amb una penalització simple. Els escenaris 2 i 3 no han presentats millores per

damunt de les 350 iteracions. Experimentacions addicionals realitzades amb 1000 iteracions, no van aportar millores amb cap de les versions després de 500 iteracions.

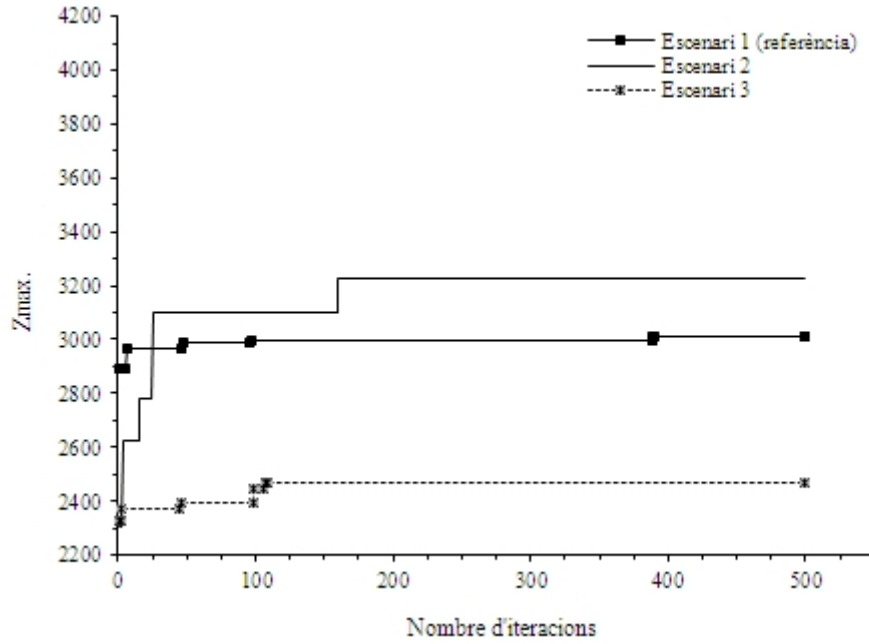


Fig. 4.3. Evolució de les millors solucions construïdes amb la versió *sP*

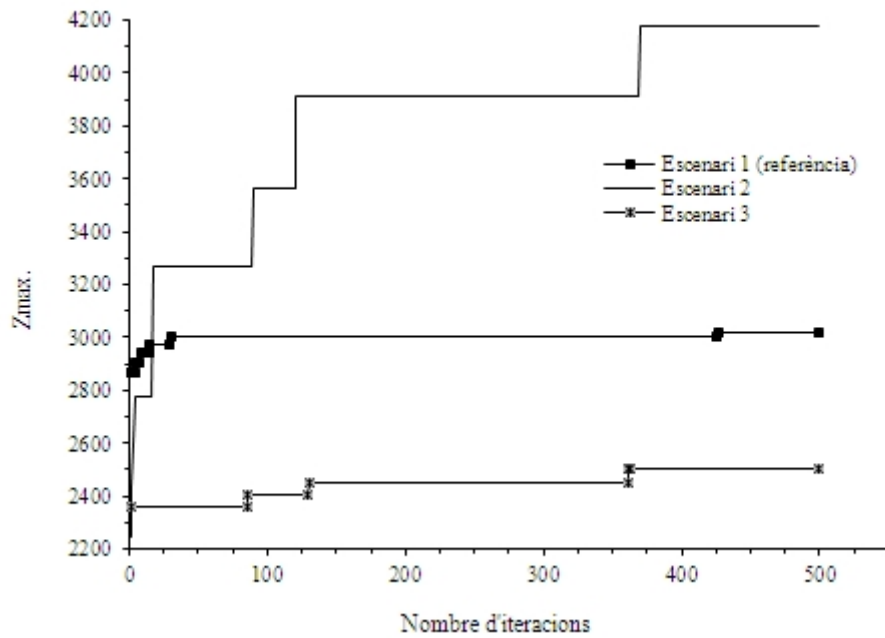


Fig. 4.4. Evolució de les millors solucions construïdes amb la versió *gP*



### Assaigs addicionals

Per tal de comparar el comportament algorísmic obtingut amb els paràmetres calibrats i sense calibrar, s'han executat simulacions sobre el cas d'estudi de referència amb les dues versions *sP* i *gP* emprant els valors dels paràmetres que es van aplicar exitosament en una altra problemàtica,<sup>100</sup> també investigada com a *problema de la motxilla*,  $a = 2, b = 15, \alpha = 1, \beta = 0.8, \rho = 0.99$  i  $Q = 1000$ , i afegint els valors  $a_1, \dots, a_5 = 2$  per a la versió *gP*. Les solucions obtingudes són:  $\bar{Z} = 2919.68$  amb  $\sigma_Z = 53.10$ , per a la versió *sP* i  $\bar{Z} = 2921.54$  amb  $\sigma_Z = 75.42$ , per a la versió *gP*. Per a ambdues versions, *sP* i *gP*, almenys 5 repeticions de l'algorisme van assolir la solució a les primeres iteracions, tal i com es pot observar a les iteracions 2, 4, 6, 9 i 10 de la Taula 4.3, i a les iteracions 3, 4, 5, 6, 7, 9 i 10 de la Taula 4.4. Aquest tipus de comportament pot ésser degut a l'elevat valor  $b = 15$ , el qual genera petits valors per a les penalitzacions (eq. 13) si  $V \geq TV_m$  quan el valor de la solució  $Z_m$  obtingut per la formiga  $m^{èsima}$  és menor que el millor valor de la solució,  $Z^*$ , obtingut a la iteració. Cal assenyalar que, amb els valors dels paràmetres calibrats pel problema objecte

Taula 4.3. Resultats obtinguts amb *sP* ( $\alpha = 1, \beta = 0.8, a = 2, b = 15, \rho = 0.99$  i  $Q = 1000$ )

Versió <i>sP</i> . Millors solucions assolides amb 500 iteracions i 10 repeticions de l'algorisme	
<b>Repetition 1 :</b> Iteration 1 -> Z : 2671.34764952796 Iteration 2 -> Z : 2856.7475429378283 Iteration 4 -> Z : 2924.1173337154596 Iteration 45 -> Z : 2979.03132585296	Iteration 2 -> Z : 2903.09493864671
<b>Repetition 2 :</b> Iteration 1 -> Z : 2774.75770653125 Iteration 2 -> Z : 2925.1143656187496	<b>Repetition 7 :</b> Iteration 1 -> Z : 2737.1731230904597 Iteration 2 -> Z : 2917.280484684211 Iteration 19-> Z : 2945.3921068029604 Iteration 47-> Z : 2960.1628835279603 Iteration 57 -> Z : 2976.021877902959
<b>Repetition 3 :</b> Iteration 1 -> Z : 2839.215160033224 Iteration 8 -> Z : 2868.1622667305924 Iteration 19-> Z : 2883.9399101332237	<b>Repetition 8 :</b> Iteration 1 -> Z : 2847.1379934628285 Iteration 2 -> Z : 2916.37808535296 Iteration 9 -> Z : 2940.344027105592 Iteration 30-> Z : 2968.8801516779604 Iteration 62 -> Z : 2976.65193152171 Iteration 75-> Z : 2982.5372782342106 Iteration 312-> Z : 2993.626476752961
<b>Repetition 4 :</b> Iteration 1 -> Z : 2937.8088300555905 Iteration 10 -> Z : 2937.808830055592 Iteration 14-> Z : 2937.8088300555924	<b>Repetition 9 :</b> Iteration 1 -> Z : 2759.4485280805907 Iteration 2 -> Z : 2843.860618702303 Iteration 7 -> Z : 2884.440434340461
<b>Repetition 5 :</b> Iteration 1 -> Z : 2842.2111439940795 Iteration 3 -> Z : 2888.529797594079 Iteration 457-> Z : 2889.878217824343	<b>Repetition 10 :</b> Iteration 1 -> Z : 2791.9707774029603 Iteration 2 -> Z : 2823.89685802796
<b>Repetition 6 :</b> Iteration 1 -> Z : 2822.7600567717104	

Taula 4.4. Resultats obtinguts amb  $gP$  ( $\alpha = 1, \beta = 0.8, a = 2, a_r = 2, b = 15, \rho = 0.99$  i  $Q = 1000$ )

**Versió  $gP$ . Millors solucions assolides amb 500 iteracions i 10 repeticions de l'algorisme**

<b>Repetition 1 :</b> Iteration 1 -> Z : 2851.726216011513 Iteration 2 -> Z : 2913.253284908224 Iteration 36 -> Z : 2926.074948037829	<b>Repetition 6 :</b> Iteration 1 -> Z : 2915.1083656128285 Iteration 3 -> Z : 2961.2966760404606
<b>Repetition 2 :</b> Iteration 1 -> Z : 2736.3710518154603 Iteration 5 -> Z : 2736.3710518154608 Iteration 44 -> Z : 2736.371051815461 Iteration 451->Z : 2736.3710518154617	<b>Repetition 7 :</b> Iteration 1 -> Z : 2774.1006708529612 Iteration 2 -> Z : 2863.3261725092107
<b>Repetition 3 :</b> Iteration 1 -> Z : 2939.78346602171 Iteration 2 -> Z : 2999.91201272171	<b>Repetition 8 :</b> Iteration 1 -> Z : 2828.667326989474 Iteration 2 -> Z : 2904.3626511342113 Iteration 13-> Z : 2937.4201680394735 Iteration 84-> Z : 2950.8172498078948 Iteration 273-> Z : 2973.220173221711
<b>Repetition 4 :</b> Iteration 1 -> Z : 2883.885382401644 Iteration 2 -> Z : 2897.197545870394 Iteration 3 -> Z : 2916.9613055891446 Iteration 8 -> Z : 2959.5155295529607	<b>Repetition 9 :</b> Iteration 1 -> Z : 2657.841760527961 Iteration 2 -> Z : 2912.888217282894
<b>Repetition 5 :</b> Iteration 1 -> Z : 2910.277189514803 Iteration 4 -> Z : 2961.4763169523026	<b>Repetition 10 :</b> Iteration 1 -> Z : 2839.899661914473 Iteration 2 -> Z : 2891.9288686085524 Iteration 11-> Z : 2921.328674976973

d'estudi, no s'assoleix la solució a les primeres iteracions, cosa que demostra que s'obté un millor comportament en utilitzar els valors calibrats dels paràmetres algorísmics.

***Versions algorísmiques MM i Hc***

El procediment de calibratge ha estat realitzat seguint la mateixa estratègia que en les propostes  $sP$  i  $gP$ . Tots els assaigs han estat realitzats amb 500 iteracions i 100 formigues per iteració, i els resultats amitjanats sobre 10 repeticions.

***Versió MM***

En l'execució de la versió  $MM$ , la primera iteració de cada repetició es va iniciar amb el mateix valor de feromona  $\tau_{\max}^0$  a totes les arestes per tal que totes presentessin la mateixa probabilitat d'ésser escollides per les formigues.<sup>24</sup> Es va escollir aquest tipus d'inicialització del valor de la feromona perquè és la que presenta una evolució dels valors de transició d'estat més lenta, cosa que afavoreix l'exploració de solucions.<sup>24</sup> El seu valor es va calcular d'acord amb el de

referència<sup>94,24,115</sup>  $\rho = 0.98$ , i amb un valor de  $Z_{\max}$  sorgit del millor resultat obtingut d'assaigs anteriors, amb la qual cosa l'equació (16) pren el valor

$$\tau_{\max}^0 = \frac{1}{1 - 0.98} 4000 = 200000$$

D'altra banda, es va assignar com a constant per a tot el procediment el valor de  $p_{best}$  (eq. 17) igual a 0.05, tal i com recomana la bibliografia.<sup>94,24,115</sup>

A la primera etapa, els valors de  $\alpha$  i  $\beta$  (eq. 8) es van calibrar usant un procediment combinatori de valors de referència<sup>94,115</sup>  $\alpha \in \{1, 2, 3\}$  i  $\beta \in \{1, 2, 3, 5\}$ , i constant  $\rho = 0.98$ .

A la segona etapa, el valor de  $\rho$  (eq. 14) es va calibrar amb els valors següents, que inclouen els de referència,<sup>94,24,115,116</sup>  $\rho \in \{0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 0.93, 0.95, 0.98, 0.99\}$  i els valors de  $\alpha$  i  $\beta$  que van obtenir la millor solució a la primera etapa, com a constants. Cal esmentar la inclusió de valors de l'interval  $[0.9, 0.99]$ , els quals es referencien pel calibratge de paràmetres d'altres problemes computacionals emprant mètodes amb límits a la quantitat de feromona.<sup>94,115,116</sup>

Per a la determinació del nombre d'iteracions de les formigues necessari per aconseguir una solució estable, es va seguir el mateix procediment que l'emprat per a les versions  $sP$  i  $gP$ .

Els valors que van obtenir les millors solucions mitjanes van ésser els següents:

$\alpha = 1, \beta = 1, \rho = 0.98$ , amb una solució de cost  $\bar{Z} = 2944.94$ ,  $\sigma_Z = 35.55$  i una  $Z_{\max} = 2993.78$ .

El valor de  $\alpha = 1$  determina que no es produeixi un pic d'exploració molt acusat a les primeres iteracions. Segons experimentacions referenciades<sup>115</sup> de *Max - Min Ant System*, a major valor de  $\alpha$ , més ràpidament s'assoleix un nivell elevat d'exploració que posteriorment decreix. Això mateix passa, tot i que de forma menys acusada, amb l'evolució del valor de  $\beta$ .<sup>115</sup> Els paràmetres  $\alpha$  i  $\beta$  tenen un rol important al emfasitzar les diferències entre les arestes del graf.<sup>116</sup> Per a ambdós valors igual a 1, es descriu<sup>115</sup> un comportament de l'algorisme amb un moviment de formigues, a les primeres iteracions, que no distingeix entre regions de l'espai de cerca que contenen solucions d'alta i de baixa qualitat. Aquest tipus de comportament es manté

fins que determinades arestes presenten valors de probabilitat que passen d'un cert límit, aleshores, el comportament esdevé diferenciador i va concentrant la cerca a les regions de bones solucions factibles, és a dir, de les millors seqüències de connexions factibles entre l'activitat industrial i el volum d'abocament. Atès que la distribució de probabilitats de la regla de transició d'estat (eq. 8) depèn d'ambdós factors: feromona i informació heurística, la relació  $\beta/\alpha = 1$  implica que la construcció de la solució no es realitza a les primeres iteracions,<sup>116</sup> amb la qual cosa s'afavoreix una cerca exhaustiva cap a solucions de qualitat. L'expansió de l'exploració està addicionalment afavorida per la cerca local dels algorismes de millora, de la mateixa manera que ho està en les altres versions estudiades.

El valor  $\rho = 0.98$  aconsegueix la millor solució (vegeu Fig. 4.5) i implica un grau d'evaporació de 0.02, el qual garanteix que, a mesura que es van executant iteracions, no decaigui ràpidament la quantitat de feromona dipositada a les arestes quan no se n'ha incrementat la quantitat dipositada d'ençà del valor màxim inicial. En tenir una persistència elevada, les quantitats de feromona de les diferents arestes presenten menors diferències que les que es presentarien amb un grau d'evaporació elevat, per tant, s'aconsegueix que la cerca de solució no quedi ràpidament limitada a una regió de l'espai de solucions. Com que és una cerca més exhaustiva, s'afavoreix la possibilitat d'obtenir solucions de major qualitat.

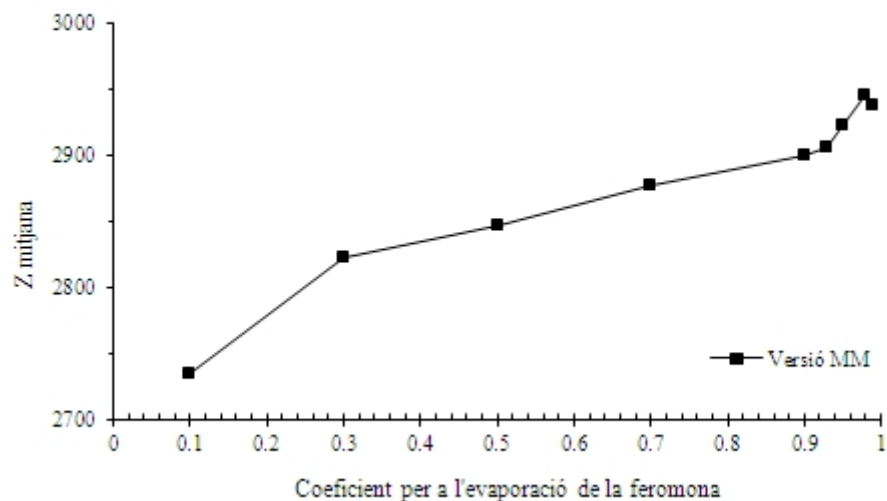


Fig. 4.5. Resultats de  $\bar{Z}$  obtinguts amb els valors de  $\rho$  provats per a MM

Per als menors valors de grau d'evaporació, es referencia<sup>24,116</sup> la necessitat d'un major nombre d'iteracions per tal d'assolir una solució estable en l'execució de l'algorisme. La Fig. 4.6 presenta l'evolució de les millors solucions obtingudes amb un nombre d'iteracions creixent. S'observen millores significatives perllongades en un nombre d'iteracions major que el requerit per a la versió *sP* en tots els escenaris. No obstant això, en comparació amb la versió *gP*, el nombre d'iteracions necessari és major a l'escenari de referència i, menor, als escenaris alternatius. Per a *MM*, no s'observen millores de la solució construïda a partir de 350 iteracions a l'escenari de referència i a partir de 225 iteracions als escenaris 2 i 3. De la mateixa manera que amb les versions *sP* i *gP*, no es van observar millores després de 500 iteracions.

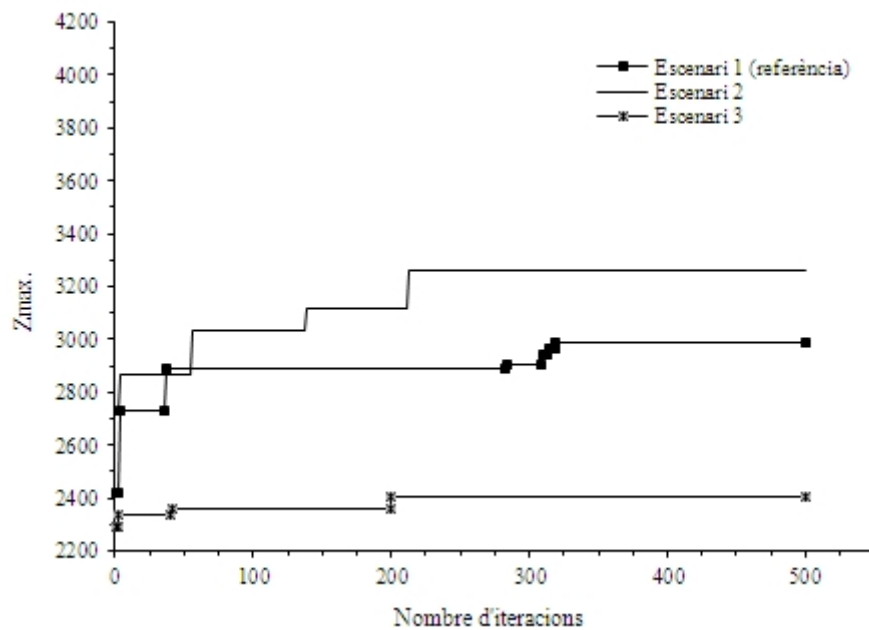


Fig. 4.6. Evolució de les millors solucions construïdes amb la versió *MM*

### Versió *Hc*

La primera iteració de cada repetició de l'algorisme, de la mateixa manera que en les versions anteriors, s'inicia amb un valor de rastre de feromona igual en totes les arestes per tal que totes presentin la mateixa probabilitat d'ésser escollides. El valor seleccionat ha estat  $\tau_0 = 0.5$  per tal de garantir la mateixa probabilitat d'elecció de les direccions possibles del moviment de les formigues per l'hiperespai.<sup>25</sup>

A la primera etapa, es van calibrar els valors  $\alpha$  i  $\beta$  (eq. 8) emprant un procediment combinatori dels valors de referència<sup>94,105</sup>  $\alpha \in \{0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5\}$  i  $\beta \in \{0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5\}$ , i mantenint constant el valor  $\rho = 0.9$ .<sup>105</sup>

A la segona etapa, el valor de  $\rho$  (eq.21) va ésser calibrat amb els valors, que inclouen els de referència,<sup>94,105</sup>  $\rho \in \{0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 0.93, 0.95, 0.98, 0.99\}$ , i els valors de  $\alpha$  i  $\beta$  que han obtingut la millor solució a la primera etapa, com a constants.

Es referència,<sup>105</sup> com a criteri per a la finalització de cada repetició de l'algorisme *Hc*, un nombre d'iteracions igual a 500. No obstant això, es va observar l'evolució de les millors solucions assolides.

Els valors que van obtenir les millors solucions mitjanes van ésser els següents:

$\alpha = 1, \beta = 5, \rho = 0.9$ , amb una solució de cost  $\bar{Z} = 2998.27, \sigma_Z = 9.19$  i una  $Z_{\max} = 3013.19$ .

Els valors de  $\alpha$  i  $\beta$  indiquen una major importància de la informació heurística (eq. 8) per guiar la cerca de solucions, que la que s'ha determinat per a la versió *MM*. El valor  $\beta = 5$ , amb un valor  $\alpha = 1$ , indica que les formigues, en disposar d'un rastre de feromona normalitzat a les arestes del graf, usen sobretot la informació heurística (eq.7) per tal de construir solucions factibles, és a dir, el comportament de les formigues es basarà en valors dels volums, càrregues contaminants i coeficients punta de les arestes del graf.

La Fig. 4.7 mostra els valors de solucions mitjanes assolides pels diferents valors provats de  $\rho$ . S'observa una clara tendència cap a una millor solució mitjana, a mesura que decreix el valor del grau d'evaporació fins a 0.1, amb l'assoliment d'un òptim per a  $\rho = 0.9$ . Per a graus d'evaporació menors de 0.1, el valor de la solució decreix, ja que es construeix la seqüència de components amb una elevada persistència de la feromona, anteriorment dipositada a les arestes, en relació amb el grau d'evaporació  $1 - \rho$ , el qual es constitueix com el factor multiplicador del valor normalitzat de la feromona addicionada (eq. 21). La relació entre ambdós valors, grau d'evaporació i persistència de la feromona, és de l'ordre de 10 vegades menor per a  $\rho = 0.99$  en relació a  $\rho = 0.9$ . Per a  $\rho = 0.99$ , els rastres de feromona a les arestes evolucionen lentament, per la qual cosa la distribució de probabilitats amb un valor  $\beta = 5$ , està fortament condicionada

per la informació heurística i  $\tau_0$ . Per a un valor  $\rho = 0.9$ , l'evolució dels rastres és més ràpida i, per tant, la feromona tot i no ésser el factor determinant que distingeix entre bones i males arestes, presenta una actuació més evident en la regla de transició d'estat. La relació  $0.1/0.9$ , amb un grau d'evaporació de 0.1 i un coeficient per a l'evaporació (persistència) de 0.9 és la que ofereix un tipus de comportament del qual s'obté la millor solució  $\bar{Z}$ .

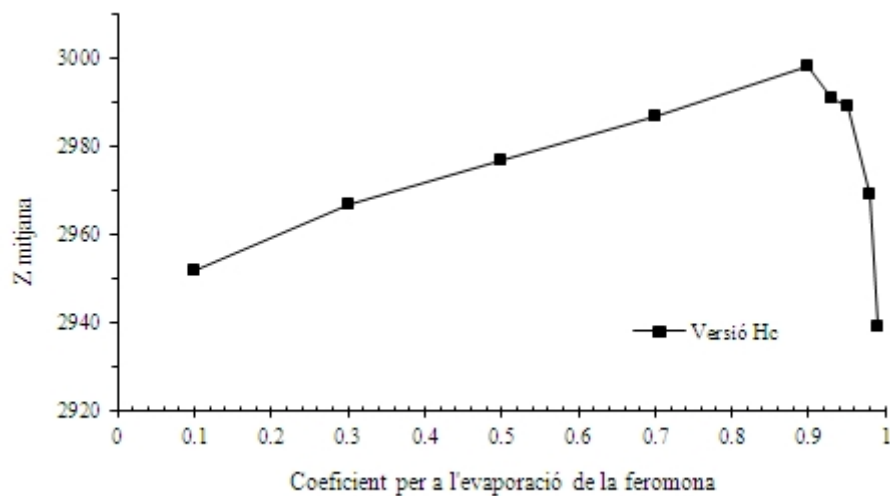


Fig 4.7. Resultats de  $\bar{Z}$  obtinguts amb els valors de  $\rho$  provats per a  $Hc$

Per a la determinació del nombre d'iteracions de les formigues necessari per aconseguir una solució estable, es va observar l'evolució de les millors solucions obtingudes en el decurs d'iteracions successives. Tal i com mostra la Fig. 4.8, es van obtenir millores petites de la solució obtinguda a partir de les 150 iteracions als escenaris de referència i al 3, i després de 100 iteracions, a l'escenari 2. No es van observar millores a partir de les 500 iteracions.

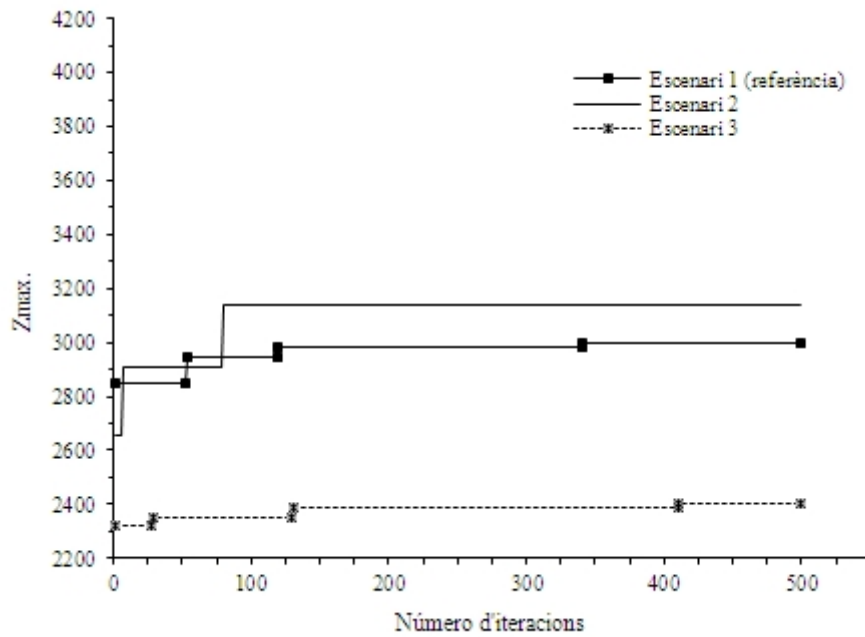


Fig. 4.8. Evolució de les millors solucions construïdes amb la versió *Hc*

### 4.1.3. Resultats i discussió del cas d'estudi

Les simulacions, emprant les versions calibrades, van ser executades en tots els escenaris amb 500 iteracions i 100 formigues per iteració i els resultats es van amitjanar sobre 10 repeticions. El valor inicial de la feromona, a totes les arestes, va ésser  $\tau_0 = 100$ , per a *sP* i *gP*,  $\tau_{\max}^0 = 200000$ , per a *MM*, i  $\tau_0 = 0.5$ , per a *Hc*. Per a cada versió algorísmica, la solució de cost ha estat relacionada amb el volum total i les càrregues totals dels contaminants  $x_r$  de les aigües residuals autoritzades a ser descarregades. El recorregut seguit per les formigues, per assolir aquesta solució, proveeix les descàrregues volumètriques corresponents a cada activitat industrial, en termes de valors que permeten calcular les càrregues individuals de contaminants.<sup>23</sup>

Així mateix, l'Apèndix detalla les descàrregues de volum i contaminants obtingudes en cada escenari per a cada repetició executada de les versions *sP*, *gP*, *MM* i *Hc*.



La Taula 4.5 recull les dades corresponents a les solucions obtingudes executant les versions *sP*, *gP*, *MM* i *Hc* en els escenaris de referència i alternatius. Les solucions  $\bar{Z}$  assolides per *sP* i *gP* en els escenaris 1 (3002.86 amb  $\sigma_z = 5.91$  i 3007.56 amb  $\sigma_z = 8.61$ , respectivament) i 3 (2450.47 amb  $\sigma_z = 21.16$  i 2457.87 amb  $\sigma_z = 29.77$ , respectivament) són similars però diferents en l'escenari 2 (2995.46 amb  $\sigma_z = 130.09$  i 4098.33 amb  $\sigma_z = 211.79$ , respectivament). El mateix comportament s'observa per *MM* i *Hc* que també mostren valors similars en els escenaris 1 (2944.94 amb  $\sigma_z = 35.55$  i 2998.27 amb  $\sigma_z = 9.19$ , respectivament) i 3 (2414.90 amb  $\sigma_z = 24.54$  i 2409.80 amb  $\sigma_z = 16.26$ , respectivament) i difereixen en l'escenari 2 (3235.72 amb  $\sigma_z = 145.89$  i 3151.10 amb  $\sigma_z = 65.94$ , respectivament). Comparativament, en els escenaris 1 i 3, les versions amb penalitzacions a la feromona assoleixen valors  $\bar{Z}$  més elevats que les versions que utilitzen límits. No obstant això, en l'escenari 2, la versió *gP* continua aconseguint el valor de  $\bar{Z}$  més elevat i, per la seva banda, la versió *sP* obté la  $\bar{Z}$  menor, és a dir, la pitjor solució en termes de cost.

### ***Escenari de referència***

La Fig. 4.9 mostra els recorreguts dels quals deriven les solucions assolides, és a dir, les descàrregues volumètriques de cada activitat industrial, que componen la solució obtinguda de l'execució de cadascuna de les versions algorísmiques. Així mateix, les descàrregues dels contaminants  $x_r$  es mostren a les Fig. de 4.10 a 4.14. Els valors representats depenen de les concentracions  $C_i^r$  i del volum de descàrrega seleccionat per construir la solució.

Les versions *sP* i *gP*<sup>23</sup> obtenen una descàrrega total igual al màxim volum admissible a l'EDAR. La tendència de les versions *sP* i *gP*, per realitzar les descàrregues, és similar al perfil inicial de volum d'aigua residual retinguda. Les diferències de comportament estan relacionades amb activitats industrials que presenten un volum de retenció d'aigua residual  $L_i \leq 500$ . Per a aquestes activitats, les descàrregues obtingudes mitjançant la versió *gP* presenten un decreixement d'un 11.6% en relació a les obtingudes a través de la versió *sP*, quan els valors dels coeficients punta són 1 per a tots els contaminants, i presenten un augment del 8.6% quan

els valors de concentració excedeixen almenys un 112% els seus valors mitjans esperats ( $T_i^r > 1$ ) per a un o diversos contaminants.

Les versions *MM* i *Hc* també segueixen un comportament de descàrrega que s'ajusta al perfil de volums inicials d'aigua residual retinguda. Tot i això, quan les activitats industrials presenten valors de  $L_i \leq 500$ , la versió *MM* obté descàrregues de volum que presenten un augment del 16.4% envers les obtingudes amb la versió *Hc*. Dins d'aquest grup, les activitats amb aigües residuals retingudes amb valors de  $T_i^r = 1$ , per a tots els contaminants, mitjançant la versió *MM*, augmenten el seu volum de descàrrega amb un 13.7% respecte del que s'obté amb la versió *Hc*, i d'un 18.6% quan  $T_i^r > 1$ , per a un o diversos contaminants. Quan les activitats industrials tenen volums retinguts  $L_i > 500$ , la versió *MM* obté descàrregues que presenten un decrement del 4.5% respecte de les obtingudes amb *Hc*.

Globalment, de la comparació del comportament de les quatre versions algorísmiques sorgeix que, per a valors de retenció d'aigua residual  $L_i \leq 500$ , la versió que obté una major descàrrega és *MM*, amb un volum total que presenta un increment mitjà del 15.7% sobre l'obtingut amb les versions *sP* i *gP*. Per a valors de  $L_i > 500$ , les versions *sP*, *gP* i *Hc* assoleixen valors similars de descàrrega, amb un augment mitjà del 4.6% respecte de l'obtingut amb *MM*.

## ***Escenari 2***

Per a l'escenari 2, la versió *gP* obté la solució millor. Ambdues versions,<sup>23</sup> *sP* i *gP*, presenten un decreixement del volum total de descàrrega, en relació a l'obtingut en els escenaris 1 i 3 a causa de les majors càrregues contaminants de la retenció inicial d'aigües residuals (Taula 4.2). En aquest escenari, els valors de  $T_i^r$  presenten una elevada variabilitat. El contaminant  $x_3$  desenvolupa un rol dominant, a causa dels valors elevats de concentració i preu. La Fig. 4.15 mostra els diferents camins seguits per ambdues versions algorísmiques. Les descàrregues obtingudes amb la versió *gP* presenten una major desviació estàndard (amb  $\sigma_{gP} = 674.98$ ) que l'obtinguda mitjançant la versió *sP* (amb  $\sigma_{sP} = 541.32$ ); però amb la versió *gP*, menys activitats industrials (76%) descarreguen aigua residual que les que ho fan (100%) amb la versió *sP*. Per a les activitats industrials amb volums inicials retinguts  $L_i < 2000$ , que corresponen al

52.3% del total d'aigua residual retinguda en aquest escenari, les descàrregues obtingudes amb la versió *gP* van ésser del 16.6% del total d'aigua residual descarregada, i d'un 61.3% menys que les obtingudes amb la versió *sP*. D'altra banda, les activitats industrials amb  $L_i \geq 2000$ , amb la versió *gP*, van presentar uns volums de descàrrega que corresponen al 83.3% del volum total descarregat i van augmentar un 28.4% respecte al volum que van descarregar mitjançant la versió *sP*. Aquest comportament es pot observar a la Fig. 4.15, per a les activitats 4, 11 i 16 amb  $L_i \geq 2000$ . Per a aquestes activitats amb  $\bar{T}^3 = 1.6$ ,  $\sigma_{T^3} = 0.46$ , les càrregues retingudes del contaminant  $x_3$  representen el 48.5% del total de càrregues de  $x_3$  de l'escenari 2; amb la versió *gP*, les seves descàrregues inclouen el 88.5% del total de  $x_3$  descarregat i representen un augment del 43.8% respecte al que es descarrega amb la versió *sP*. Les descàrregues del contaminant  $x_3$  es poden observar a la Fig. 4.18, mentre que les descàrregues de la resta de contaminants es mostren a les Fig. 4.16, 4.17 i 4.19, 4.20.

Les versions *MM* i *Hc* també obtenen un menor volum total de descàrrega que l'obtingut en els escenaris 1 i 3. Les descàrregues obtingudes per ambdues versions presenten valors similars de volum total (Taula 4.5) i de desviació estàndard ( $\sigma_{MM} = 271.6$  i  $\sigma_{Hc} = 264.8$ ). Per a les activitats industrials amb  $L_i < 2000$ , la versió *MM* assoleix descàrregues que representen el 40.8% del volum total descarregat en aquest escenari, i presenten un decreixement del 3.4 % respecte del que s'obté amb la versió *Hc*. Per a les activitats industrials amb  $L_i \geq 2000$ , els valors de volum de descàrrega assolits amb *MM* representen un 59.2% del volum total de descàrrega, i, un increment del 7.2% respecte del que presenten amb *Hc*. Per a aquestes activitats, la versió *MM* assoleix una descàrrega de contaminant  $x_3$  que representa un 60.4% del total de contaminant  $x_3$  que es descarrega en aquest escenari.

Globalment, per a valors de  $L_i < 2000$ , les versions *sP*, *MM* i *Hc* obtenen, en aquest escenari, un volum total de descàrrega que presenta un augment d'un 172.2% de mitjana respecte de l'obtingut amb la versió *gP*. No obstant això, per a valors de  $L_i \geq 2000$ , *sP*, *MM* i *Hc* obtenen una descàrrega total que suposa un decrement mitjà del 22.8% respecte del que s'obté amb la versió *gP*.

### *Escenari 3*

A l'escenari 3, les versions *sP* i *gP*<sup>23</sup> obtenen valors similars de descàrregues totals de volum i de contaminants. La Fig. 4.21 mostra els recorreguts que produeixen aquestes solucions. La desviació estàndard de les descàrregues volumètriques de cada activitat industrial és menor amb la versió *sP* (amb  $\sigma_{sP} = 190.97$ ) que amb la versió *gP* (amb  $\sigma_{gP} = 246.13$ ). El valor més elevat de  $\sigma_{gP}$  és probablement causat pels múltiples factors inclosos en la penalització. La distribució de descàrregues obtingudes a partir del mateix volum de retenció ( $L_i = 1000$ ) per a totes les activitats industrials, i els mateixos valors de coeficient punta que a l'escenari 1, presenten un comportament relacionat amb el contaminant  $x_3$ , el qual té un paper predominant, seguit pels contaminants  $x_2$  i  $x_1$ . Les activitats industrials amb valors de  $C_i^3 < \bar{C}^3$ ,  $C_i^2 < \bar{C}^2$ ,  $C_i^1 < \bar{C}^1$ , per a almenys dos d'aquests contaminants, assoleixen descàrregues amb volums  $V_i \leq \frac{1}{2} L_i$  per ambdues, *sP* i *gP*, versions. Les activitats industrials 1, 2, 9, 11, 13, 14, 16, 17 i 18 presenten concentracions inicials dels contaminants  $x_3$ ,  $x_2$  i  $x_1$  menors que els seus corresponents valors mitjans en aquest escenari, per a un mínim de dos d'aquests contaminants. D'altra banda, les activitats industrials amb  $C_i^3 > \bar{C}^3$ ,  $C_i^2 > \bar{C}^2$ ,  $C_i^1 > \bar{C}^1$  per a almenys dos d'aquests contaminants, presenten descàrregues amb volums  $V_i > 500$ . Les activitats industrials 4, 15, 22 i 23 mostren aquest comportament. En aquestes activitats s'observa que les concentracions inicials dels contaminants  $x_3$ ,  $x_2$  i  $x_1$  són majors que els seus corresponents valors mitjans en aquest escenari, per a dos o més d'aquests contaminants.

El recorregut traçat amb la versió *MM*, que s'observa a la Fig. 4.21, presenta descàrregues amb una major desviació estàndard ( $\sigma_{MM} = 218.52$ ) que la de les assolides mitjançant la versió *Hc* ( $\sigma_{Hc} = 177.47$ ). Amb *MM*, un 30.9% del total de les descàrregues presenten valors  $V_i \leq \frac{1}{2} L_i$  que representen un 8.5% d'augment respecte del volum total de descàrrega obtingut amb la versió *Hc*. La versió *MM* tendeix a majors volums de descàrregues que la versió *Hc* per a les activitats industrials amb  $C_i^3 < \bar{C}^3$ ,  $C_i^2 < \bar{C}^2$ ,  $C_i^1 < \bar{C}^1$ , per a almenys dos d'aquests contaminants. Altrament, mitjançant la versió *MM*, les descàrregues de volum  $V_i > \frac{1}{2} L_i$  assoleixen un valor total que presenta un decrement del 3.3% respecte del que s'ha

assolit amb la versió *Hc* . La versió *Hc* obté majors volums de descàrregues que la versió *MM* per a les activitats industrials amb valors  $C_i^3 > \bar{C}^3$  ,  $C_i^2 > \bar{C}^2$  ,  $C_i^1 > \bar{C}^1$  , per a almenys dos d'aquests contaminants . Amb tot, s'observen excepcions de comportament. Tal i com es pot observar a la Fig. 4.21, amb la versió *MM* , les activitats 11 i 17 descarreguen  $V_i > 500$  i l'activitat 22 descarrega  $V_i < 500$  . Les Fig. de 4.22 a 4.26 mostren les descàrregues dels contaminants  $x_r$ , assolides per a cada activitat industrial en aquest escenari.

Globalment, la versió *Hc* obté la major descàrrega total de volums  $V_i > \frac{1}{2}L_i$  , els quals representen el 71.5% del volum total que descarrega en aquest escenari, que representa un increment del 3.3% respecte del que s'ha obtingut amb la versió *MM* i un augment mitjà del 19.9% respecte de les versions amb penalitzacions.

El valors inicials de volum d'aigua residual retinguda i concentració de contaminant  $x_3$  exerceixen un efecte important en tots els escenaris pel que fa a la distribució de les descàrregues obtinguda . En el cas que els valors d'aigua residual retinguda siguin iguals, també tenen importància els valors de les concentracions dels contaminants  $x_2$  i  $x_1$ .<sup>23</sup>

Taula 4.5. Resultats de cost i descàrregues totals obtinguts amb  $sP$ ,  $gP$ ,  $MM$  i  $Hc$  en els escenaris de referència i alternatius

		$sP$			$gP$			$MM$			$Hc$		
		Escenari 1	Escenari 2	Escenari 3	Escenari 1	Escenari 2	Escenari 3	Escenari 1	Escenari 2	Escenari 3	Escenari 1	Escenari 2	Escenari 3
	$\bar{Z}$ (Cost)	3002.86	2995.46	2450.47	3007.56	4098.33	2457.87	2944.94	3235.72	2414.9	2998.27	3151.10	2409.80
	$\sigma_Z$	5.91	130.09	21.16	8.61	211.79	29.77	35.55	145.89	24.54	9.19	65.94	16.26
$V_i$	$\sum_{i=1}^n V_i$ (m <sup>3</sup> )	12000	6550	11970	12000	6070	11960	12000	6790	12000	11990	6620	11990
	$\sum_{i=1}^n V_i$ respecte a $V$ (%)	100	54.6	99.7	100	50.6	99.7	100	56.6	100	99.9	55.2	99.9
	$\sum_{i=1}^n V_i$ respecte a $\sum_{i=1}^n L_i$ (%)	81.6	44.6	47.9	81.6	41.3	47.8	81.6	46.2	48.0	81.6	45.0	47.9
$x_1$	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^1$ (Kg)	3245.3	2849.3	4704.7	3235.6	3109.9	4739.9	3338.1	2507.2	4605	3230.5	2538.6	4627.8
	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^1$ respecte a $VC^1$ (%)	38.6	33.9	56.0	38.5	37.0	56.4	39.7	29.8	54.8	38.5	30.2	55.1
	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^1$ respecte a $\sum_{i=1}^n L_i C_i^1$ (%)	75.9	33.3	52.5	75.7	36.4	52.9	78.1	29.3	51.4	75.6	29.7	51.7
$x_2$	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^2$ (Kg)	4748.3	4532.4	5246.3	4766.9	4201.5	5320.9	4693.4	4486.5	5163.2	4738.5	4615.6	5333.9
	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^2$ respecte a $VC^2$ (%)	60.9	58.1	67.3	61.1	53.9	68.2	60.2	57.5	66.2	60.7	59.2	68.4
	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^2$ respecte a $\sum_{i=1}^n L_i C_i^2$ (%)	83.2	39.7	52.9	83.6	36.8	53.6	82.3	39.3	52.0	83.1	40.5	53.8

$x_3$	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^3$ (Kg)	8323.1	8382.4	8362.1	8321.8	8373.6	8273.8	8300	8367.6	8324.7	8349.3	8374.6	8363.6
	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^3$ respecte a $VC^3$ (%)	99.1	99.8	99.5	99.1	99.7	98.5	98.8	99.6	99.1	99.4	99.7	99.6
	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^3$ respecte a $\sum_{i=1}^n L_i C_i^3$ (%)	83.4	42.0	50.9	83.4	41.9	50.4	83.2	41.9	50.7	83.7	41.9	50.9
$x_4$	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^4$ (Kg)	381.9	433.1	280.5	372.2	429.3	288.6	372.4	436.1	275.9	376.3	438.7	271.4
	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^4$ respecte a $VC^4$ (%)	31.8	36.1	23.4	31.0	35.8	24.1	31.0	36.3	22.9	31.3	36.6	22.6
	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^4$ respecte a $\sum_{i=1}^n L_i C_i^4$ (%)	89.5	50.7	52.1	87.2	50.3	53.6	87.2	51.1	51.3	88.2	51.4	50.4
$x_5$	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^5$ (Kg)	53.9	66.6	54.0	52.1	48.3	52.0	50.4	66	57.1	52.0	67.2	53.1
	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^5$ respecte a $VC^5$ (%)	22.5	27.7	22.5	21.7	20.1	21.7	21.0	27.5	23.8	21.7	28.0	22.1
	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^5$ respecte a $\sum_{i=1}^n L_i C_i^5$ (%)	88.2	54.5	52.9	85.3	39.5	51.0	82.5	54.0	55.9	85.1	54.9	52.1

## Descàrregues d'aigua residual obtingudes per a cada activitat industrial en l'escenari de referència

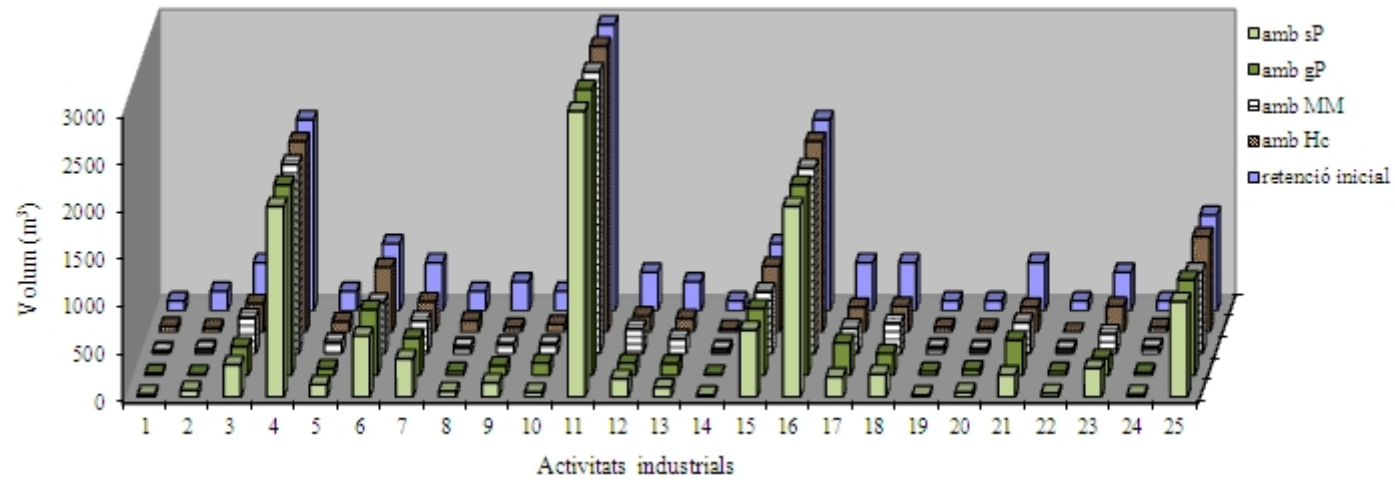


Fig. 4.9. Descàrregues volumètriques assolides, mitjançant l'execució de *sP*, *gP*, *MM* i *Hc*, en l'escenari de referència

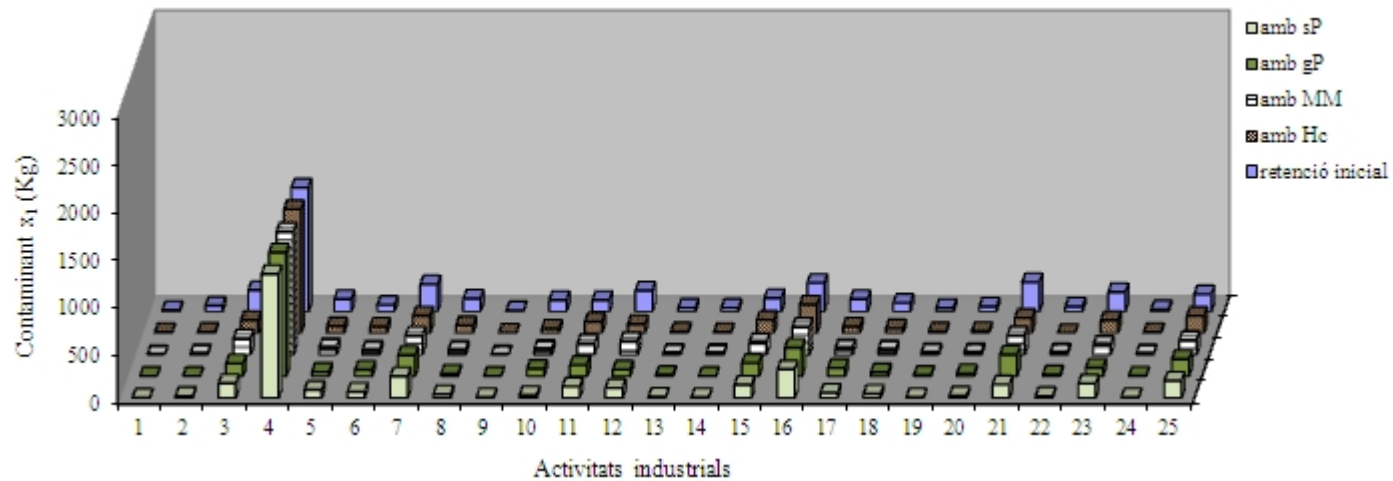


Fig. 4.10. Descàrregues de MES assolides, mitjançant l'execució de *sP*, *gP*, *MM* i *Hc*, en l'escenari de referència



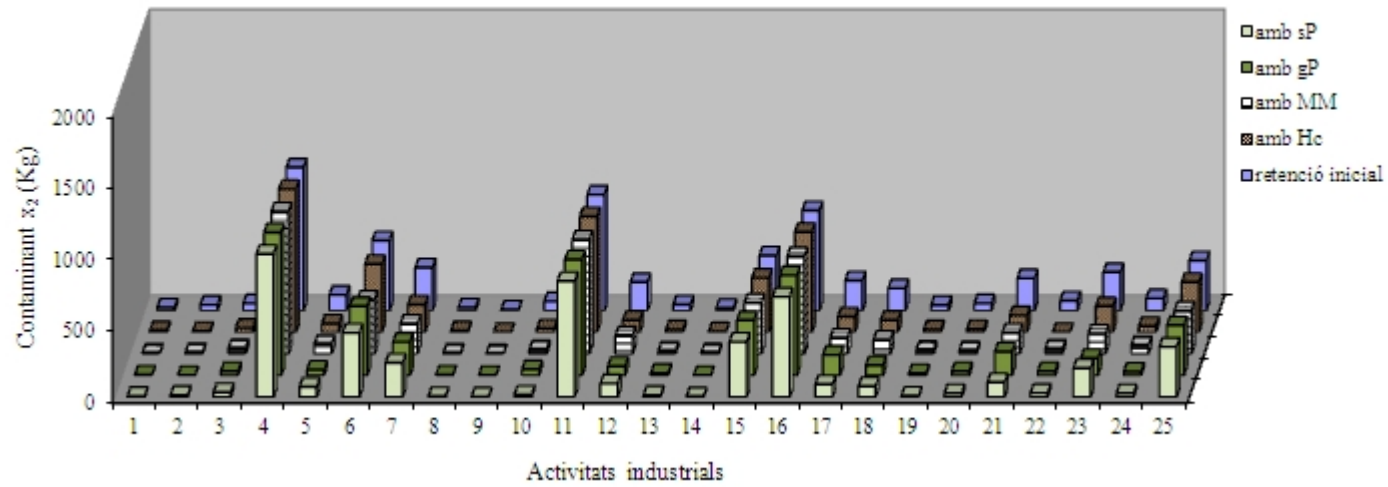


Fig. 4.11. Descàrregues de DBO assolides, mitjançant l'execució de  $sP$ ,  $gP$ ,  $MM$  i  $Hc$ , en l'escenari de referència

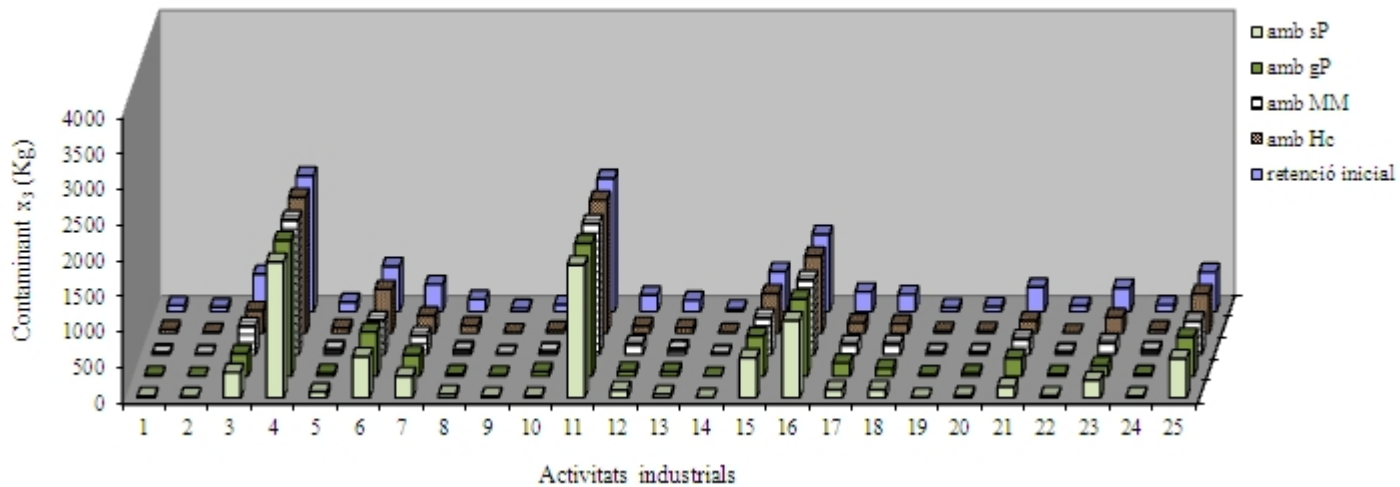
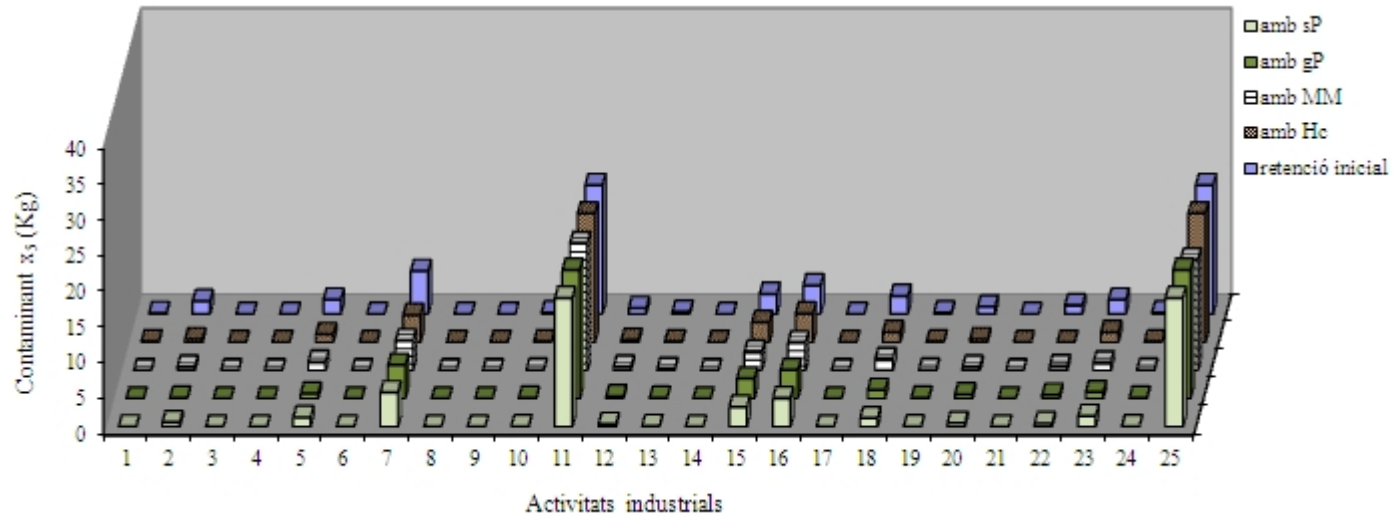
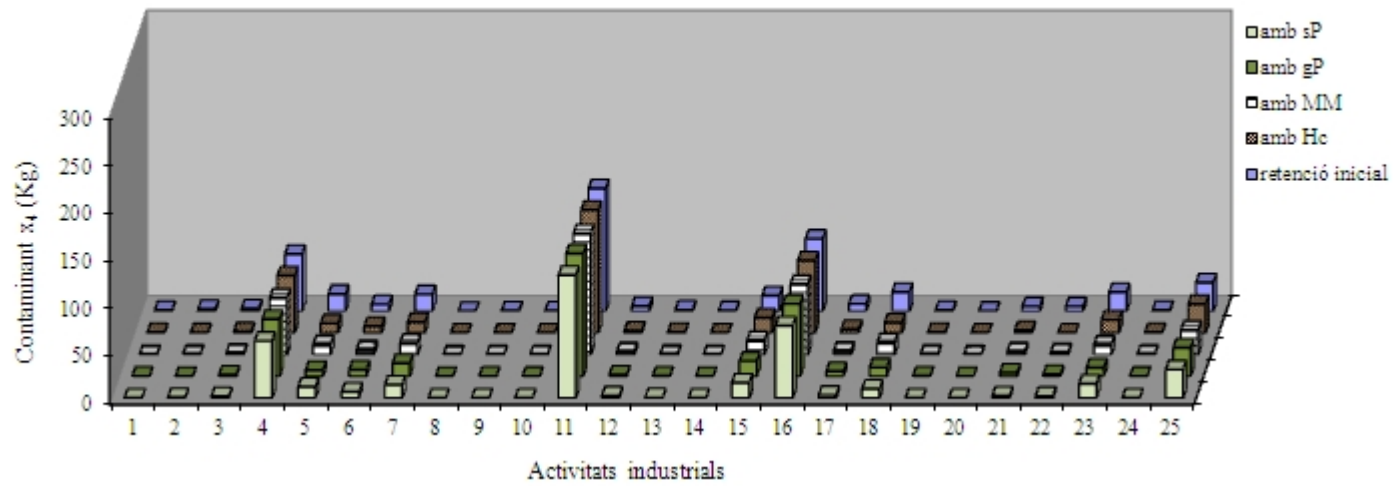


Fig. 4.12. Descàrregues de DQO assolides, mitjançant l'execució de  $sP$ ,  $gP$ ,  $MM$  i  $Hc$ , en l'escenari de referència



## Descàrregues d'aigua residual obtingudes per a cada activitat industrial en l'escenari 2

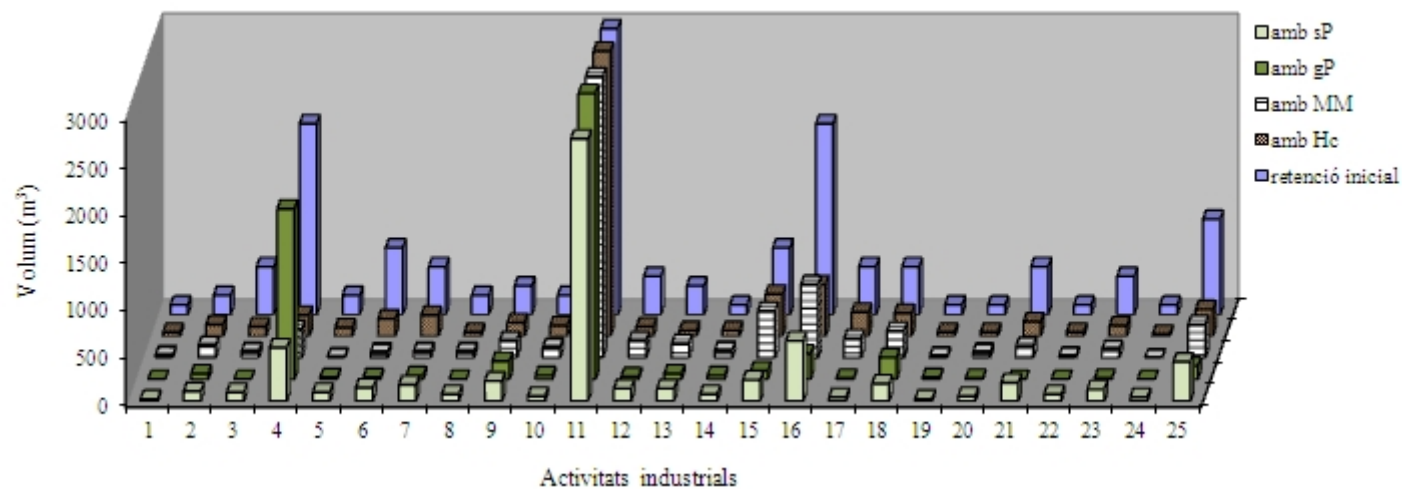


Fig.4.15. Descàrregues volumètriques absolides, mitjançant l'execució de  $sP$ ,  $gP$ ,  $MM$  i  $Hc$ , en l'escenari 2

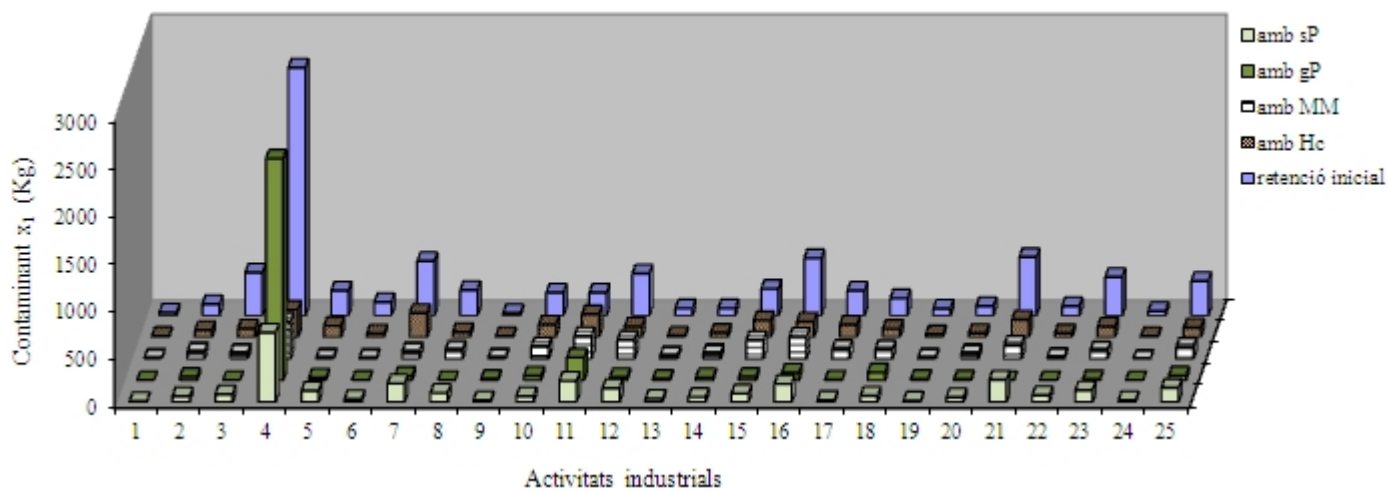


Fig. 4.16. Descàrregues de MES absolides, mitjançant l'execució de  $sP$ ,  $gP$ ,  $MM$  i  $Hc$ , en l'escenari 2

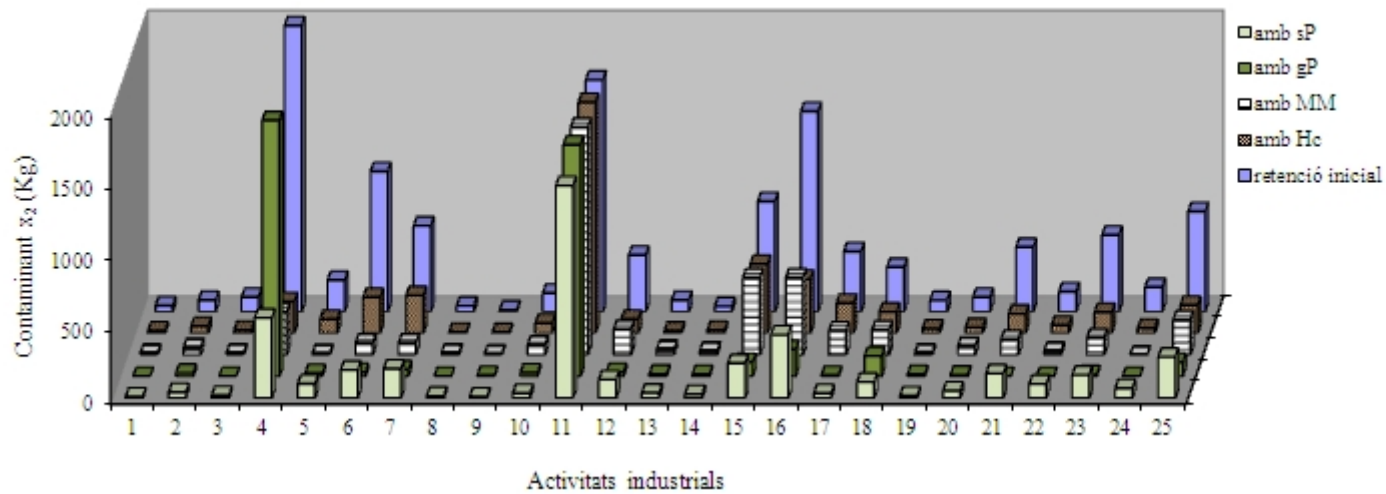


Fig. 4.17. Descàrregues de DBO assolides, mitjançant l'execució de *sP*, *gP*, *MM* i *Hc*, en l'escenari 2

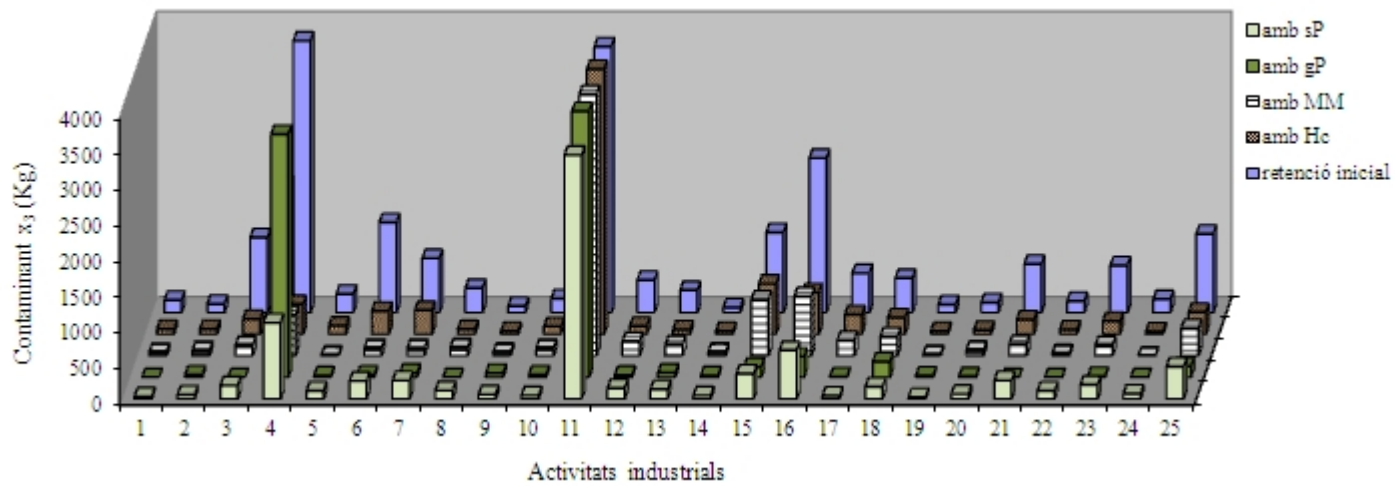


Fig. 4.18. Descàrregues de DQO assolides, mitjançant l'execució de *sP*, *gP*, *MM* i *Hc*, en l'escenari 2

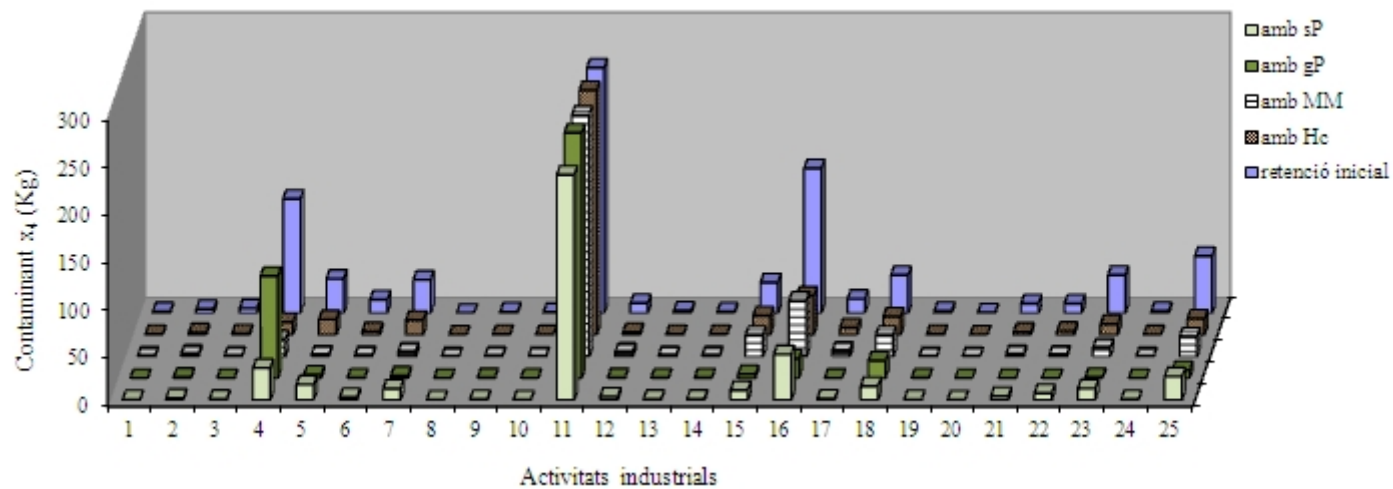


Fig. 4.19. Descàrregues de NT assolides, mitjançant l'execució de  $sP$ ,  $gP$ ,  $MM$  i  $Hc$ , en l'escenari 2

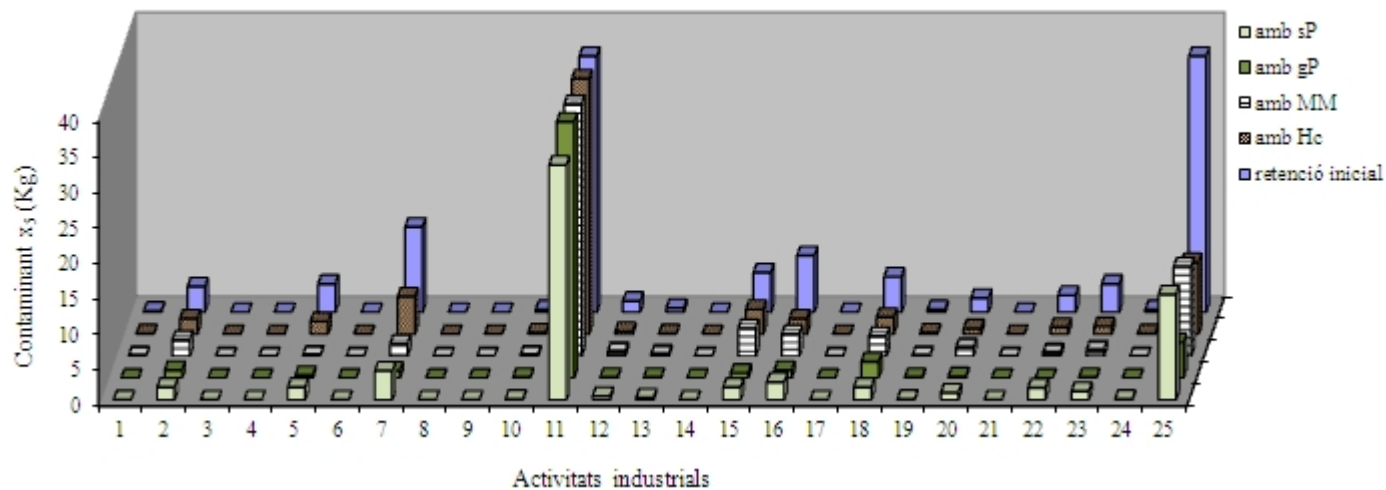


Fig. 4.20. Descàrregues de PT assolides, mitjançant l'execució de  $sP$ ,  $gP$ ,  $MM$  i  $Hc$ , en l'escenari 2

### Descàrregues d'aigua residual obtingudes per a cada activitat industrial en l'escenari 3

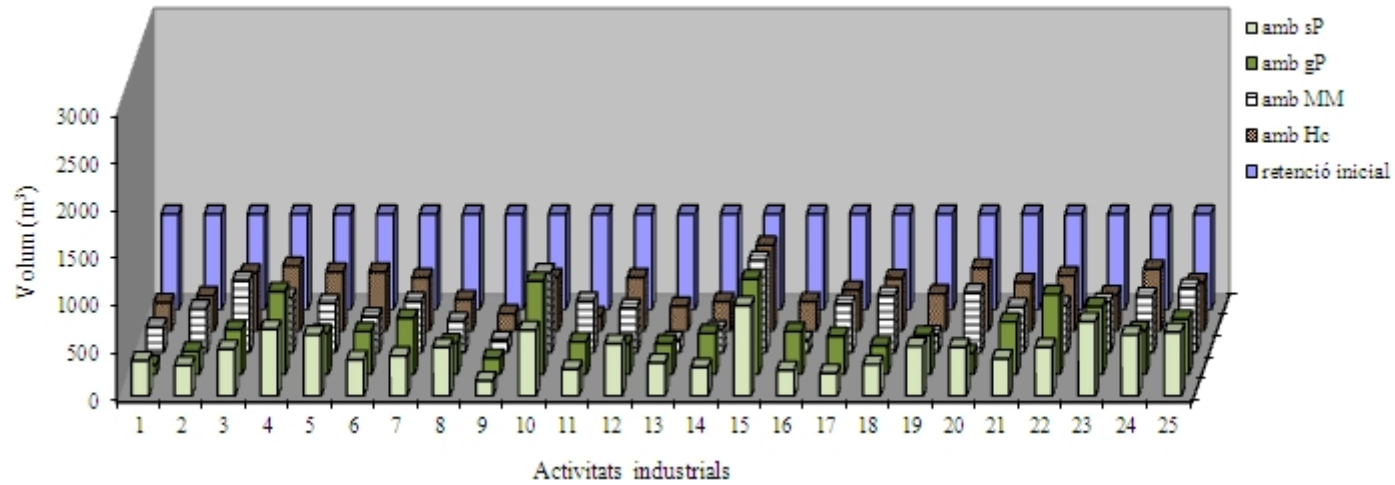


Fig. 4.21. Descàrregues volumètriques absolides, mitjançant l'execució de *sP*, *gP*, *MM* i *Hc*, en l'escenari 3

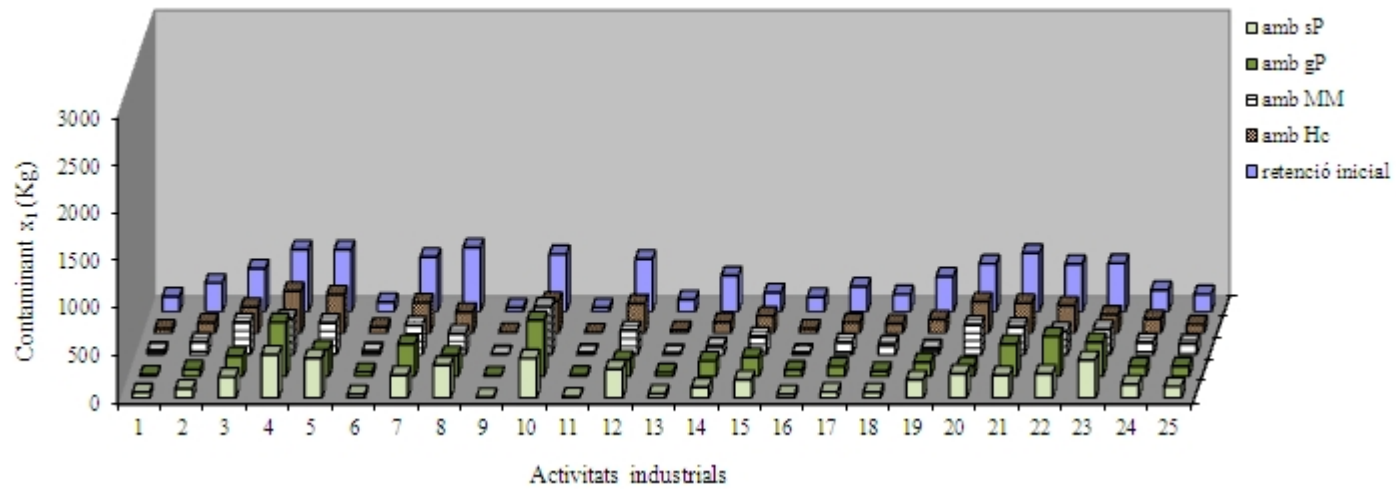


Fig.4.22. Descàrregues de MES absolides, mitjançant l'execució de *sP*, *gP*, *MM* i *Hc*, en l'escenari 3

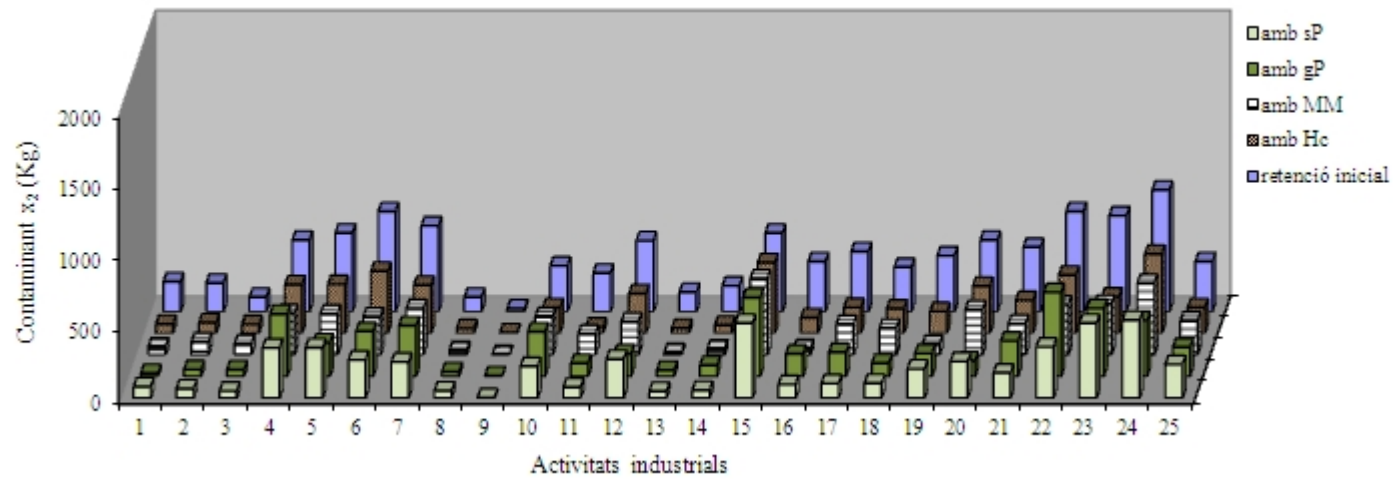


Fig.4.23. Descàrregues de DBO assolides, mitjançant l'execució de *sP*, *gP*, *MM* i *Hc*, en l'escenari 3

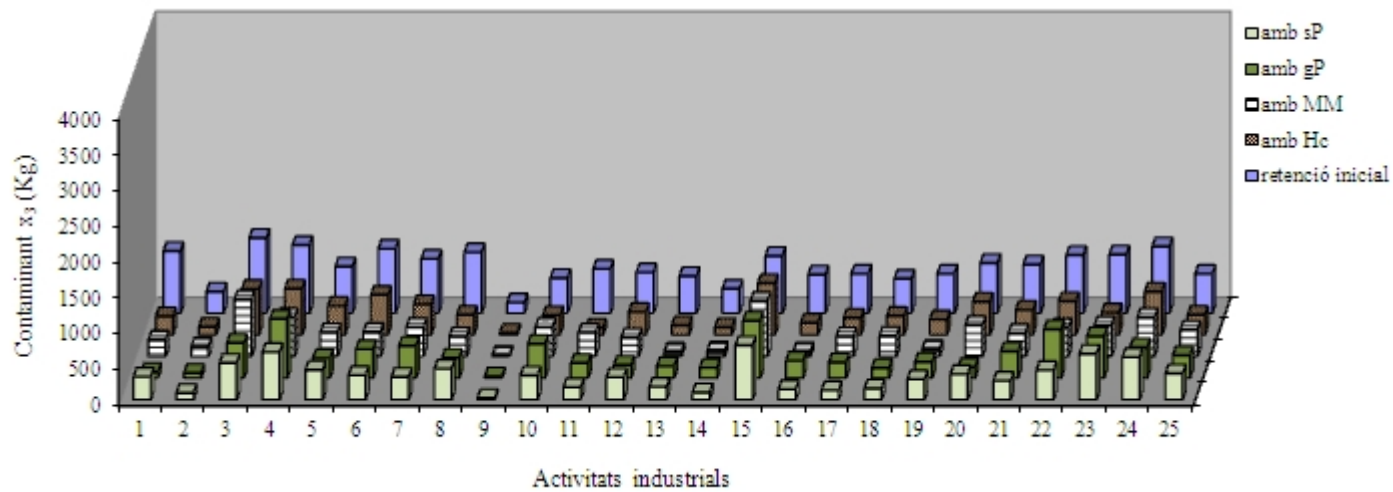


Fig. 4.24. Descàrregues de DQO assolides, mitjançant l'execució de *sP*, *gP*, *MM* i *Hc*, en l'escenari 3

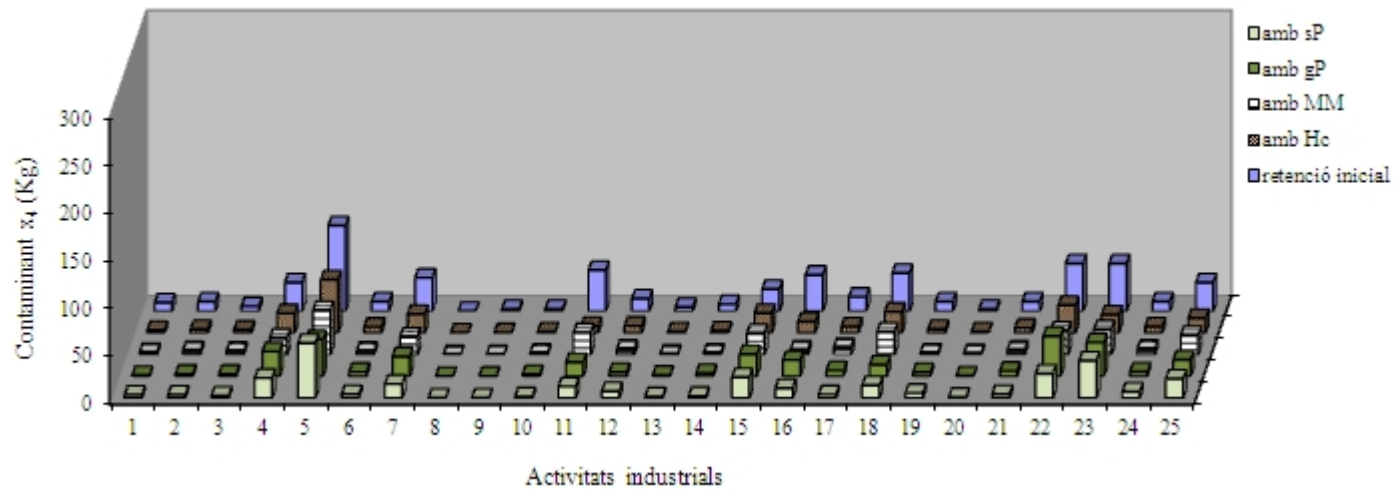


Fig.4.25. Descàrregues de NT assolides, mitjançant l'execució de  $sP$ ,  $gP$ ,  $MM$  i  $Hc$ , en l'escenari 3

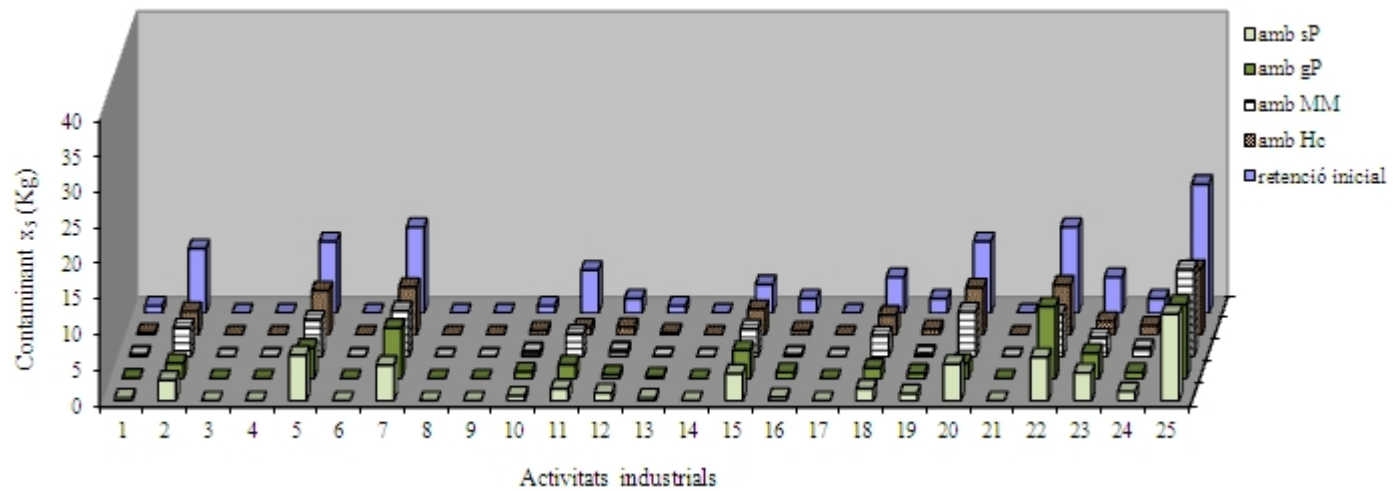


Fig. 4.26. Descàrregues de PT assolides, mitjançant l'execució de  $sP$ ,  $gP$ ,  $MM$  i  $Hc$ , en l'escenari 3





## 4.2. Implementació de l'agent Coordinador en el context multiagent

L'agent Coordinador amb els procediments interns de coordinació de les aigües residuals d'origen domèstic, meteorològic i industrial i, si escau, de prioritització de les aigües residuals industrials mitjançant una metaheurística ACO, s'ha implementat en el context multiagent per tal de verificar el seu funcionament en un context global de cicles consecutius. Aquesta implementació s'ha realitzat en llenguatge Java.

Previ a l'inici de l'execució de simulacions (vegeu Fig. 4.27) s'ha procedit a:

- la instanciació (funcions externes) dels agents Domèstiques, Meteorologia, EDAR i Indústria, per tal de disposar en cada cicle de les dades que ha d'adquirir l'agent Coordinador. Les dades corresponen a les respectives propostes d'aportacions a l'EDAR d'aigües residuals retingudes  $L_D$  i  $C_D^r$ ,  $L_M$  i  $C_M^r$ ,  $V_T$  i  $V_T C_T^r$ , i  $L_i$  i  $C_i^r$  amb  $r = 1, \dots, 5$ , les quals deriven dels càlculs de previsió que internament ha de realitzar cada agent, a partir de les lectures dels sensors als dipòsits de retenció corresponents;

- la definició dels valors que es mantenen constants per a tots els cicles de funcionament. Aquests valors són el nombre de cicles a executar, la configuració algorísmica corresponent a la versió ACO seleccionada incloent els valors dels paràmetres calibrats, i els corresponents als costos unitaris  $P^r$  dels contaminants  $x_r$ , als pesos  $w^r$  dels contaminants  $x_r$  i als valors preestablerts mitjans de concentracions  $\bar{X}_i^r$  (valors esperats en el decurs d'un funcionament normal de cada activitat industrial) pels contaminants  $x_r$  amb  $r = 1, \dots, 5$ .

Se selecciona la versió algorísmica *MM* per a l'execució del procés de prioritització dels efluents industrials, en haver obtingut les solucions amb els majors volums totals de descàrrega. La Taula 4.5 mostra que, en l'escenari de referència ACO, la versió *MM* obté igual volum total de descàrrega que les versions *sP* i *gP*, i major que l'obtingut amb la versió *Hc*. Així mateix, en els escenaris alternatius, el volum total obtingut amb *MM* ha estat major que l'obtingut amb les versions *sP*, *gP* i *Hc*.

L'agent Coordinador s'ha dissenyat per a una execució cíclica, per la qual cosa les simulacions del seu comportament s'han realitzat de forma cíclica. Cada cicle segueix les etapes d'execució,

detallades a l'apartat 3.3.1, corresponents a:

- la importació de dades dels agents A. domèstiques  $L_D$  i  $C_D^r$ , Meteorologia  $L_M$  i  $C_M^r$ , i EDAR  $V_T$  i  $V_T C_T^r$ ,
- l'acceptació de les descàrregues de  $L_D = V_D$  i  $L_M = V_M$ . A més dels càlculs de la disponibilitat  $V$  i  $VC^r$  de l'EDAR per admetre aigües residuals industrials,

$$V = V_T - V_D - V_M$$

$$VC^r = V_T C_T^r - V_D C_D^r - V_M C_M^r$$

- la importació de dades de cada agent Indústria  $L_i$  i  $C_i^r$  i els càlculs de  $\sum_{i=1}^n L_i$  i  $\sum_{i=1}^n L_i C_i^r$ ,
- la presa de decisió sobre la realització del procés de prioritització,
- l'execució de l'algorisme de prioritització ACO si es verifica alguna de les condicions següents

$$\sum_{i=1}^n L_i > V$$

$$\sum_{i=1}^n L_i C_i^r > VC^r, r = 1, \dots, 5$$

en qualsevol altre cas no s'executa,

- l'obtenció de la solució de descàrregues  $V_i$ , si s'ha executat la prioritització o de la solució de descàrregues  $V_{in}$  si no s'ha executat.

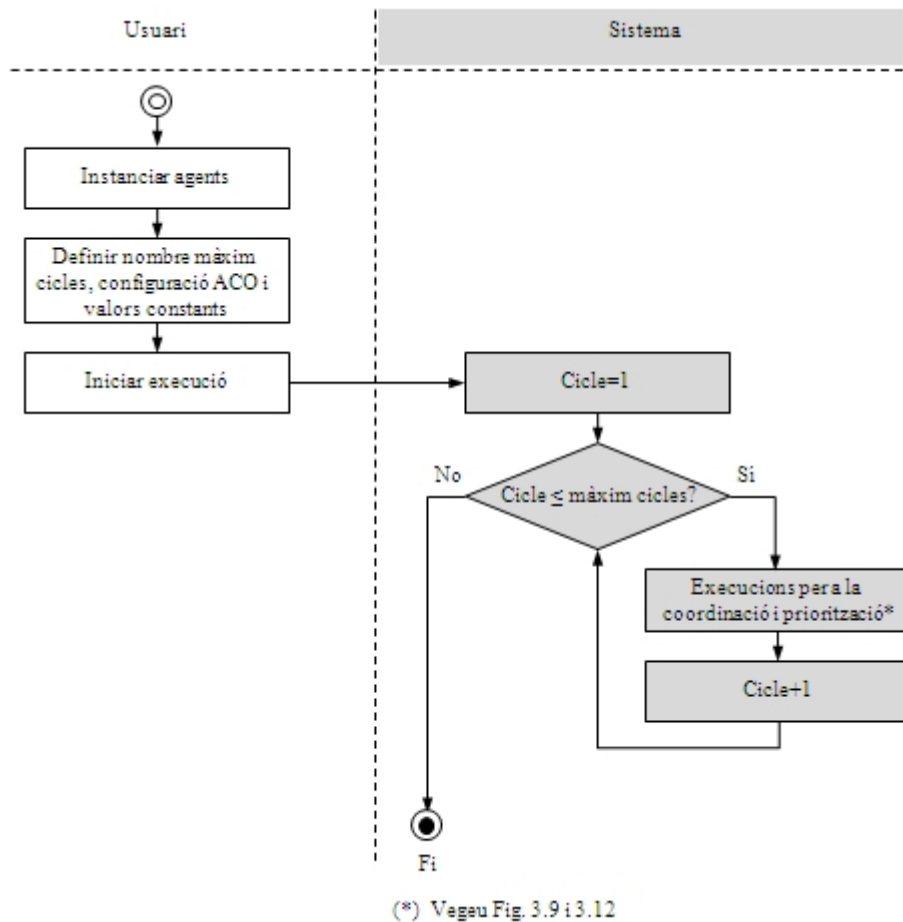


Fig. 4.27. Diagrama de flux de l'execució de simulacions amb l'agent Coordinador

#### 4.2.1. Definició d'escenaris

S'han definit 10 escenaris per a l'execució de les simulacions. Cadascun correspon a un cicle de funcionament del sistema de sanejament.

Per a tots els escenaris, s'han mantingut constants els valors corresponents a:

- valors de funcionament algorísmic: 500 iteracions i 100 formigues per iteració, i els resultats amitjanats sobre 10 repeticions de l'algorisme;

- valor calibrats dels paràmetres algorísmics corresponents a la versió *MM*, és a dir,  $\alpha = 1, \beta = 1, \rho = 0.98, \tau_{\max}^0 = 200000$ ;
- els costos unitaris  $P^r$  dels contaminants  $x_r, r = 1, \dots, 5$ , (Taula 4.1);
- els pesos  $w^r$  dels contaminants  $x_r, r = 1, \dots, 5$  (Taula 4.1);
- els valors preestablerts mitjans de concentracions  $\bar{X}_i^r$  pels contaminants  $x_r, r = 1, \dots, 5$  corresponents als valors esperats en el decurs d'un funcionament normal de cada activitat industrial (Taula 4.6 i Annex II).

La Taula 4.6 presenta l'escenari corresponent al primer cicle d'execució de l'agent Coordinador, amb els valors de les característiques de les propostes d'aportacions d'aigües residuals d'origen domèstic,  $L_D$  i  $C_D^r$ , meteorològic,  $L_M$  i  $C_M^r$ , de la disponibilitat de l'EDAR per admetre noves aportacions  $V_T$  i  $V_T C_T^r$ , i de volums  $L_i$  i concentracions  $C_i^r, r = 1, \dots, 5$  de les aigües residuals industrials. Per a aquestes darreres dades i, en aquest escenari, els valors són iguals que els considerats a l'escenari de referència ACO.

Els escenaris corresponents al segon i successius cicles es detallen a l'Annex II.

Taula 4.6. Dades corresponents a les propostes dels agents en el primer cicle d'execució de l'agent Coordinador

CICLE 1												
					$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$			
A. Domèstiques	$L_D$	( $m^3$ )	8000	$C_D^r$	( $g/m^3$ )	200	190	450	40	7.5		
Meteorologia	$L_M$	( $m^3$ )	0	$C_M^r$	( $g/m^3$ )	0	0	0	0	0		
EDAR	$V_T$	( $m^3$ )	20000	$V_T C_T^r$	(Kg)	10000	9320	12000	1520	300		
Activitats Industrials												
$i$	$L_i$ ( $m^3$ )	$\bar{X}_i^r$ ( $g/m^3$ )					$C_i^r$ ( $g/m^3$ )					
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	
1	100	200	150	1010	19	9	157	210	870	9	1	
2	200	300	350	500	25	13	300	200	300	10	9	
3	500	500	100	850	5	0	450	100	1050	5	0	
4	2000	750	500	850	40	0	650	500	950	30	0	
5	200	650	750	800	90	10	650	550	650	90	10	
6	700	100	700	800	20	0	100	700	900	10	0	
7	500	650	750	800	35	15	570	600	760	35	12	
8	200	610	100	740	0	0	670	100	850	0	0	
9	300	50	20	200	2	0	40	20	150	2	0	
10	200	167	171	433	2	1	600	320	490	2	1	
11	3000	64	249	623	40	4	40	270	620	43	6	
12	400	300	415	670	5	1	550	495	570	13	2	
13	300	950	188	375	12	4	125	135	520	4	1	
14	100	350	200	500	15	2	375	180	340	7	0	
15	700	180	95	810	30	1	200	550	800	23	4	
16	2000	300	800	940	35	6	150	350	540	38	2	
17	500	760	620	1150	5	0	260	420	550	15	0	
18	500	160	360	580	90	7	180	310	480	40	5	
19	100	565	690	950	20	1	365	390	550	10	2	
20	100	600	750	800	10	15	500	500	700	2	10	
21	500	600	750	800	10	15	612	450	680	10	0	
22	100	700	1300	2325	20	10	498	700	810	50	12	
23	400	500	600	950	50	15	506	670	820	50	5	
24	100	500	800	1000	50	15	226	850	930	10	2	
25	1000	300	400	650	20	0	180	350	550	30	18	

Taula 4.7. Dades relacionades amb les aigües residuals industrials (disponibilitat del tractament i previsió de les aportacions) a cada cicle d'execució de l'agent Coordinador

			CICLES									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
EDAR	$V$	(m <sup>3</sup> )	12000	14000	13500	12800	13800	14400	14900	15000	15800	12900
	$VC^r$	$x_1$	8400	8365	8780	9506	8552	10853	10392	9950	9566	8727
		$x_2$	7800	7175	6880	7672	8552	8397	7881	8050	7969	6729
		$x_3$	8400	10430	9985	10022	11298	10168	10337	11775	11320	9429
		$x_4$	1200	1330	1205	1116	1258	1276	1193	1200	1489	1219
		$x_5$	240	308	247	234	207	286	219	290	277	251
A. Industrials	$\sum_{i=1}^n L_i$	(m <sup>3</sup> )	14700	18900	18400	17500	17400	17100	16700	18100	16100	16500
	$\sum_{i=1}^n L_i C_i^r$	$x_1$	4274	5796.1	5314.1	5494.8	5371.7	5342.5	5222.1	5081.2	4861.3	5157
		$x_2$	5704.5	7054.6	6880.6	6695.8	6593.9	6508.4	6484.8	6809	6226.9	6041.1
		$x_3$	9975	12919.1	12788.1	12181.4	11504.8	11569.4	11274.2	11901.5	10698	11088.6
		$x_4$	426.8	534.1	539.2	498.2	488.8	470.4	472.9	503.3	404.6	410.1
		$x_5$	61.1	83.9	88.9	75.1	69.2	59.6	61	83	63.9	50.5

La Taula 4.7 mostra les dades que corresponen als càlculs de la disponibilitat  $V$  i  $VC^r$  de l'EDAR, per a les aigües residuals industrials a cadascun dels cicles, una vegada han estat autoritzades totes les propostes d'aigües residuals d'origen domèstic i pluvial. Així mateix, es presenten els valors de volums totals retinguts  $\sum_{i=1}^n L_i$  i càrregues de contaminants totals retingudes  $\sum_{i=1}^n L_i C_i^r$  de les propostes industrials. Per a tots els cicles, es compleix que  $\sum_{i=1}^n L_i > V$ , per la qual cosa s'executa el procés de prioritització en tots. La mitjana dels volums totals retinguts a cada cicle és un 23.8% superior als volums  $V$  disponibles a l'EDAR. A més, la mitjana de les càrregues de contaminant  $x_3$  a cada cicle, exceptuant el 9, és un 15% superior al valor de la disponibilitat  $VC^3$  del tractament.

A la Fig. 4.28 es pot observar la dinàmica dels volums d'aigua residual retinguda de cadascuna de les activitats industrials.

#### **4.2.2. Resultats i discussió de l'execució**

Les simulacions s'han executat consecutivament sobre els escenaris proposats.

Per a tots els cicles, les propostes d'aigües residuals d'origen domèstic i meteorològic s'han autoritzat com a descàrregues i s'han prioritzat les propostes d'aigües residuals industrials. La Taula 4.8 mostra els resultats de les descàrregues totals obtingudes per a les activitats industrials.



Taula 4.8. Resultats de les descàrreges d'aigües residuals industrials obtingudes a cada cicle d'execució de l'agent Coordinador

		Cicle 1	Cicle 2	Cicle 3	Cicle 4	Cicle 5	Cicle 6	Cicle 7	Cicle 8	Cicle 9	Cicle 10
$V_i$	$\sum_{i=1}^n V_i$ (m <sup>3</sup> )	12000	14000	13500	12800	13800	14400	14900	15000	15800	12900
	$\sum_{i=1}^n V_i$ respecte a $V$ (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	$\sum_{i=1}^n V_i$ respecte a $\sum_{i=1}^n L_i$ (%)	81.6	74.1	73.4	73.1	79.3	84.2	89.2	82.9	98.1	78.2
$x_1$	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^1$ (Kg)	3297.4	4138.7	3336.0	3789.7	4185.8	4616.9	4672.6	4014.6	4794.1	3963.2
	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^1$ respecte a $VC^1$ (%)	39.3	49.5	38.0	39.9	48.9	42.5	45.0	40.3	50.1	45.4
	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^1$ respecte a $\sum_{i=1}^n L_i C_i^1$ (%)	77.2	71.4	62.8	69.0	77.9	86.4	89.5	79.0	98.6	76.9
$x_2$	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^2$ (Kg)	4724.5	5282.4	5186.7	4935.5	5266.4	5830.2	6000.3	5753.6	6174.2	5048.0
	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^2$ respecte a $VC^2$ (%)	60.6	73.6	75.4	64.3	61.6	69.4	76.1	71.5	77.5	75.0
	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^2$ respecte a $\sum_{i=1}^n L_i C_i^2$ (%)	82.8	74.9	75.4	73.7	79.9	89.6	92.5	84.5	99.2	83.6

$x_3$	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^3$ (Kg)	8379.5	9924.9	9498.6	9028.1	9215.1	10137.8	10241.8	9976.2	10563.9	8946.1
	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^3$ respecte a $VC^3$ (%)	99.8	95.2	95.1	90.1	81.6	99.7	99.1	84.7	93.3	94.9
	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^3$ respecte a $\sum_{i=1}^n L_i C_i^3$ (%)	84.0	76.8	74.3	74.1	80.1	87.6	90.8	83.8	98.7	80.7
$x_4$	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^4$ (Kg)	365.8	441.8	444.9	403.1	410.7	417.2	441.3	433.1	402.9	347.5
	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^4$ respecte a $VC^4$ (%)	30.5	33.2	36.9	36.1	32.6	32.7	37.0	36.1	27.1	28.5
	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^4$ respecte a $\sum_{i=1}^n L_i C_i^4$ (%)	85.7	82.7	82.5	80.9	84.0	88.7	93.3	86.1	99.6	84.7
$x_5$	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^5$ (Kg)	51.8	65.3	66.9	51.0	47.6	50.9	52.5	66.9	63.8	37.6
	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^5$ respecte a $VC^5$ (%)	21.6	21.2	27.1	21.8	23.0	17.8	24.0	23.1	23.0	15.0
	$\sum_{i=1}^n V_i C_i^5$ respecte a $\sum_{i=1}^n L_i C_i^5$ (%)	84.8	77.8	75.3	67.9	68.8	85.4	86.1	80.6	99.8	74.5



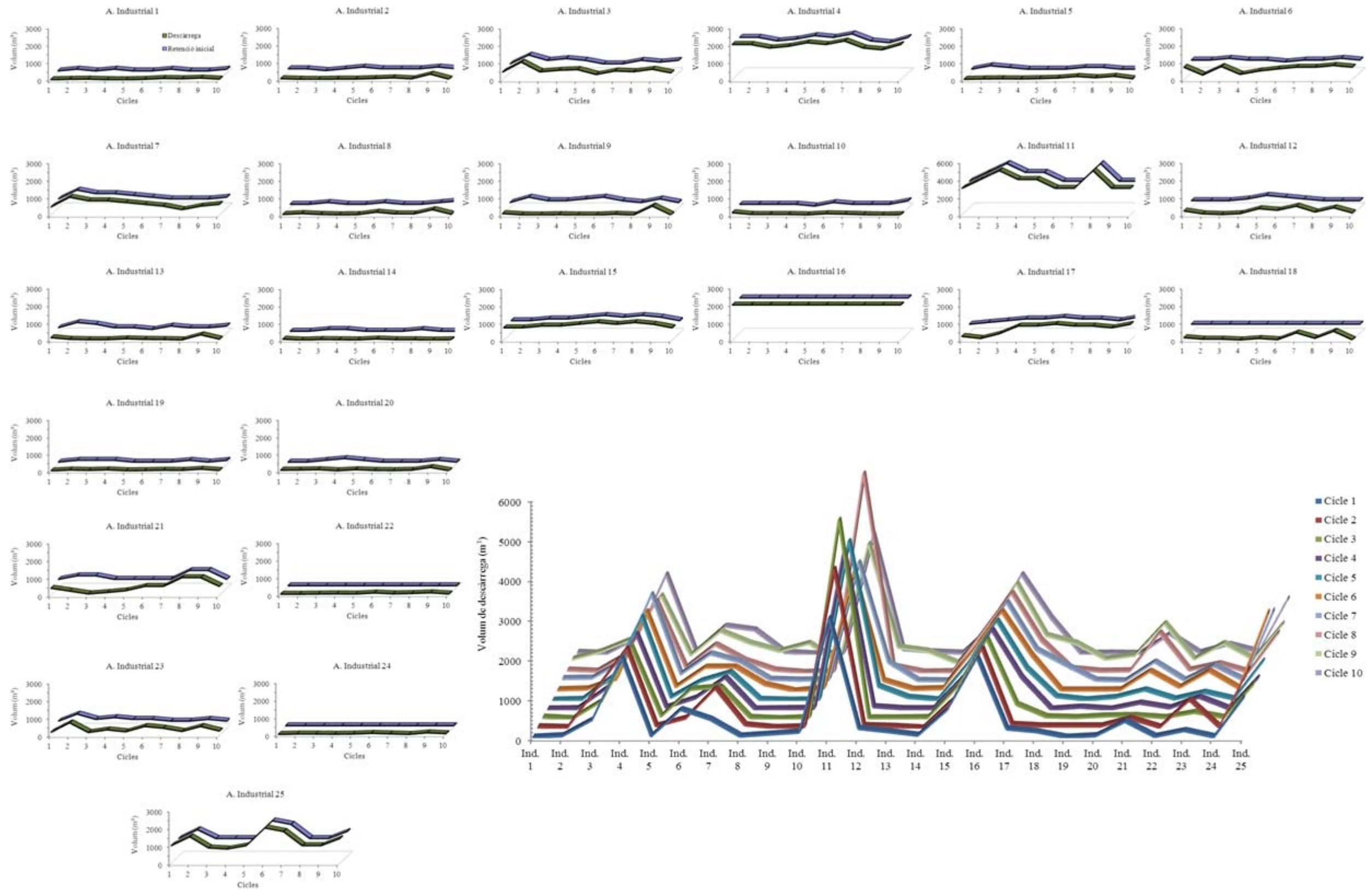


Fig. 4.28. Resultats de descàrregues d'aigües residuals, per a cada activitat industrial, en tots els cicles d'execució



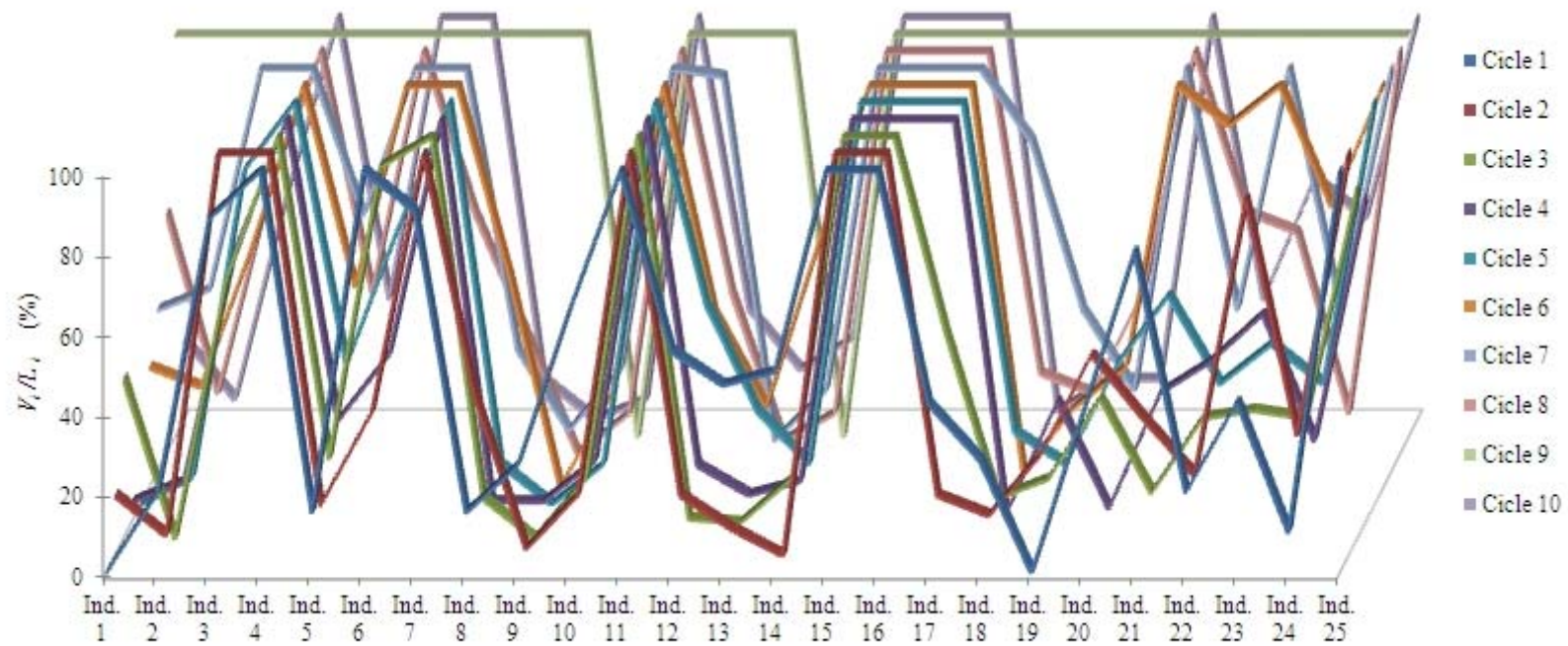


Fig. 4.29. Resultats de descàrreges volumètriques normalitzades, per a cada activitat industrial, en tots els cicles d'execució

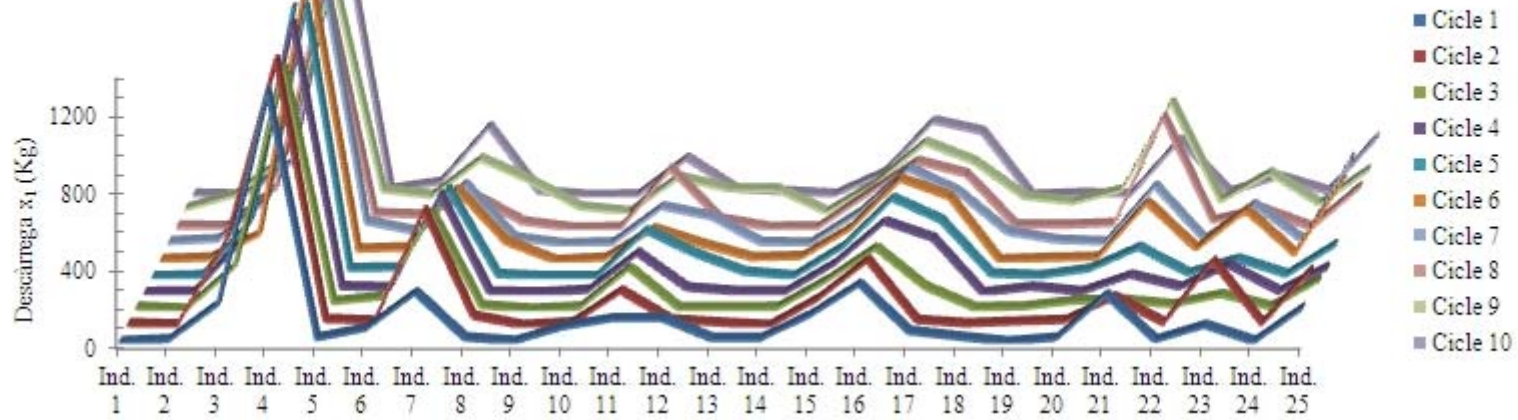


Fig. 4.30. Descàrregues de MES assolides, per a cada activitat industrial, en tots els cicles d'execució

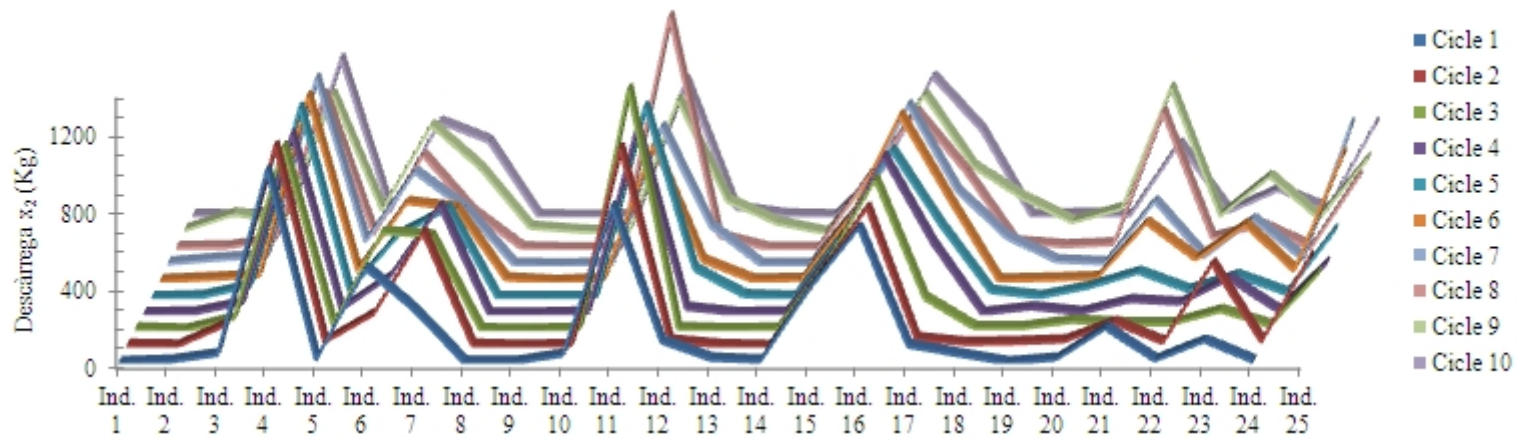


Fig. 4.31. Descàrregues de DBO assolides, per a cada activitat industrial, en tots els cicles d'execució



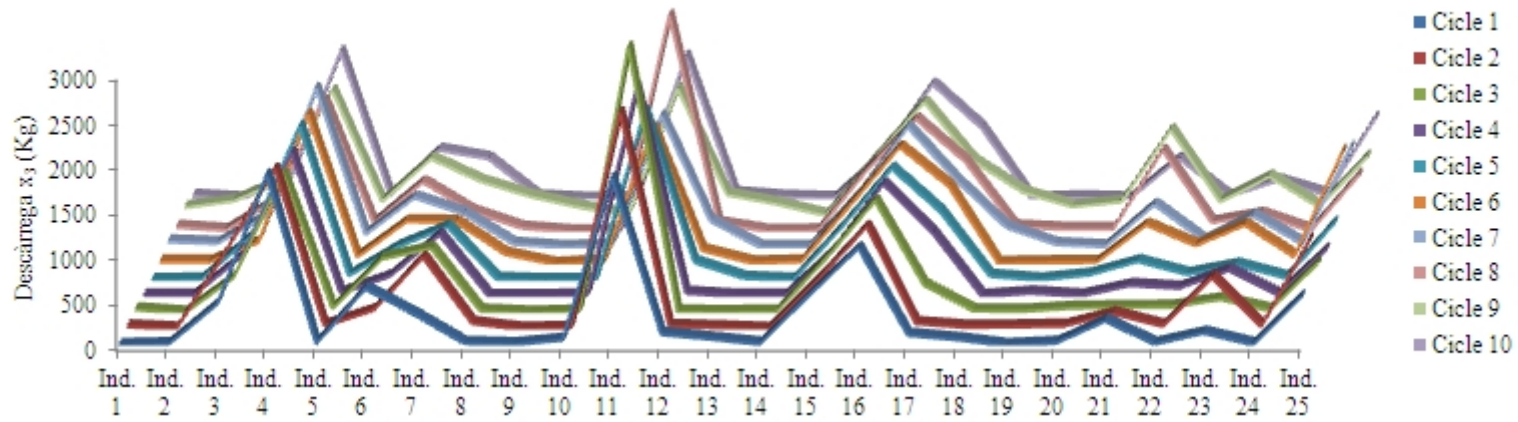


Fig. 4.32. Descàrregues de DQO assolides, per a cada activitat industrial, en tots els cicles d'execució

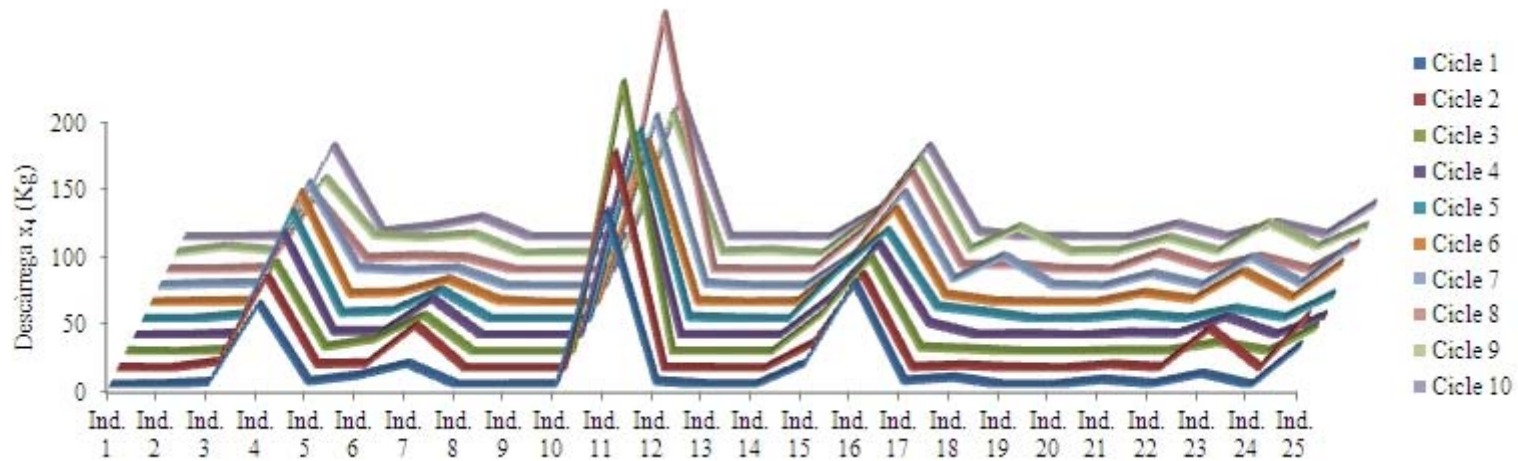


Fig. 4.33. Descàrregues de NT assolides, per a cada activitat industrial, en tots els cicles d'execució



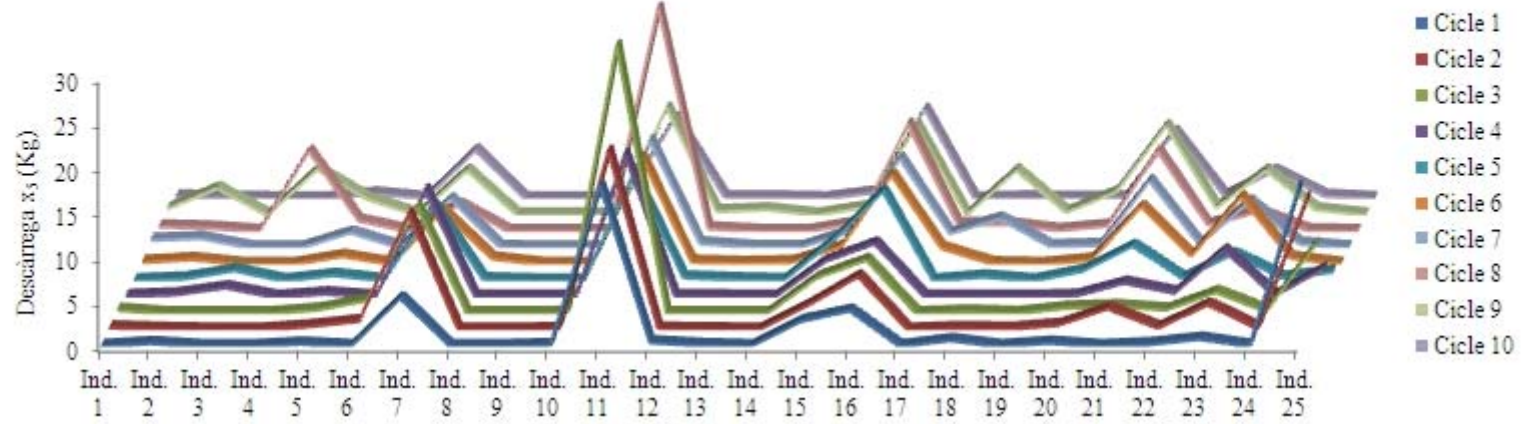


Fig. 4.34. Descàrregues de PT assolides, per a cada activitat industrial, en tots els cicles d'execució

Tots els cicles executats mostren un valor de volum total de descàrrega igual al màxim volum admissible a l'EDAR. Les descàrregues de contaminants, tal i com feien preveure els resultats obtinguts prèviament en el cas d'estudi ACO, prenen els valors més elevats respecte a les càrregues admissibles a l'EDAR pel contaminant  $x_3$ , seguit pels contaminants  $x_2$  i  $x_1$ . Cal esmentar específicament el comportament obtingut en el cicle 9, el qual correspon a un escenari en què  $\sum_{i=1}^n L_i C_i^r < VC^r$  i únicament  $\sum_{i=1}^n L_i > V$ , per la qual cosa s'obté una solució amb una aportació total dels contaminants  $x^r, r=1, \dots, 5$  a l'EDAR que és aproximadament la totalitat de les càrregues contaminants retingudes.

La Fig. 4.28 mostra, a més de les retencions inicials, les descàrregues d'aigua residual assolides per a cada activitat industrial en cada cicle. Les majors descàrregues s'obtenen de les activitats industrials amb majors volums retinguts, tal i com es pot observar per a les activitats 4, 11, 16 i 25. No s'observa cap activitat, incloses les que presenten un valor  $L_i \leq 500$ , que no aportin aigua residual a l'EDAR en cap dels cicles d'execució. En el cicle 9, les activitats 10 i 14, que tenen valors de  $L_i < 500$  i les menors càrregues de contaminant  $x_3$  del cicle, no obtenen volum de descàrrega.

La Fig. 4.29 mostra les descàrregues volumètriques normalitzades respecte als corresponents volums retinguts. Les activitats 7, 17, 21 i 25 amb  $L_i \geq 500$  presenten valors  $V_i / L_i < 1$ , per a entre 2 i 5 cicles, que corresponen als cicles que tenen menors valors de  $C_i^3$ . Les Fig. 4.30 a 4.34 presenten les descàrregues de contaminants  $x^r, r=1, \dots, 5$  per a cada activitat industrial i cicle de funcionament.

El comportament de la prioritització dels efluents industrials, en el context d'execució de l'agent Coordinador, ha estat similar al descrit a l'apartat 4.1.3. No s'han evidenciat problemes en l'adquisició de les dades específiques de cada cicle ni en la seva incorporació al funcionament algorítmic.

L'execució de l'agent Coordinador en cicles successius del context multiagent, s'ha ajustat a les expectatives de la seva conceptualització.



## Capítol 5

# Conclusions

El sistema d'aigües residuals urbanes constitueix un sistema complex. La recerca desenvolupada permet confirmar les dues hipòtesis de treball plantejades:

- el paradigma d'agents i sistemes multiagent com a element capaç de gestionar les aigües residuals del sistema de sanejament (*Hipòtesi 1*);
- la capacitat d'un mètode basat en una optimització de colònia de formigues per a la gestió de les aportacions d'aigües residuals industrials a l'EDAR (*Hipòtesi 2*).

Així mateix, es confirma que s'han assolit els objectius vinculats a cadascuna d'elles, els quals d'acord amb la Hipòtesi 1 permeten concloure que:

- l'aplicació del paradigma d'agents i sistemes multiagent constitueix un nou enfocament, com a sistema d'ajut a la decisió autònom, adreçat a contribuir als esforços d'assolir una gestió eficaç que ajudi a l'obtenció d'unes característiques de les aigües sanejades adequades per a la preservació del bon estat ecològic de les lleres receptores;
- la conceptualització del sistema es pot realitzar en diferents nivells d'abstracció d'acord amb els objectius (d'un o diversos components) del sanejament;

- la modelització del funcionament del sistema multiagent es pot realitzar d'acord amb l'estructuració de les funcions i la coordinació de les interaccions entre els components dels diferents nivells organitzatius;

- la modelització del funcionament intern de cada agent es pot realitzar d'acord amb els objectius de les funcions particulars de cada agent, les interaccions amb l'entorn i les adequacions al context global. Aquesta modelització pot ser heterogènia per a diferents tipus d'agents i pot incorporar, si es considera convenient, mètodes deterministes i/o estocàstics;

- els agents poden coincidir o no amb components físics del sanejament;

- els agents poden incloure tasques de previsió que permetin aportar solucions a problemes previsibles, abans que es produeixin, o bé, poden actuar de forma reactiva;

- la coordinació de les aportacions a l'EDAR constitueix un punt clau del funcionament del sistema, per la qual cosa s'ha definit, i posteriorment implementat de manera satisfactòria en un context multiagent, un agent Coordinador;

- l'agent Coordinador executa adequadament tasques de prioritització de les descàrregues d'aigües residuals industrials amb l'objectiu de no sobrecarregar l'EDAR si no disposa de capacitat suficient (en volum i càrregues de contaminants) per admetre totes les aportacions que li són proposades. El procés de prioritització s'executa, al nivell intracomponent de l'agent, però necessita que s'adquireixin dades d'altres agents del sistema, per la qual cosa ha d'executar-se en un context multiagent;

- la implementació del procés de prioritització, que en si mateix constitueix un nou sistema multiagent compost d'entitats computacionals anomenades formigues és indicatiu que, a nivell intern, també hi ha estructuració de decisions.

D'acord amb la Hipòtesi 2 es conclou que:

- el problema de la prioritització de les aportacions d'aigües residuals industrials a l'EDAR es pot conceptualitzar com un problema de la *motxilla multidimensional* (ateses les restriccions assenyalades pels volums i càrregues contaminants que són admissibles per al tractament, d'acord amb la disponibilitat a cada cicle);

- el mètode ACO proposat per modelar les descàrregues d'aigües residuals industrials constitueix una nova contribució als esforços adreçats a prevenir sobrecàrregues d'entrada a l'EDAR;
- les quatre versions algorísmiques ACO, *sP*, *gP*, *MM* i *Hc*, proposades com a instanciacions del mètode, permeten tractar la variabilitat dinàmica de les aportacions industrials;
- el comportament de les quatre versions algorísmiques millora quan l'execució es du a terme amb valors calibrats dels paràmetres algorísmics;
- la solució de cost obtinguda de les execucions algorísmiques està orientada a la maximització de la descàrrega total d'aigua residual i a la descàrrega de les aigües residuals industrials que presenten una major urgència relativa;
- per a un conjunt d'activitats industrials, les quals no presenten grans volums d'aigües residuals retingudes ni tampoc grans augments de les seves concentracions de contaminants en relació als seus valors mitjans esperats (p.e. l'escenari de referència), el comportament de les descàrregues resulta conseqüent amb els perfils inicials d'aigües residuals retingudes per a qualsevol de les quatre versions algorísmiques proposades;
- per a un conjunt d'activitats industrials que tenen elevades càrregues contaminants a l'aigua residual retinguda i, alhora, un elevat augment de les seves concentracions de contaminants en relació als valors mitjans esperats (p.e. escenari 2), la versió *gP* tendeix a afavorir les descàrregues de poques activitats industrials i les majors descàrregues a partir de les majors retencions volumètriques. Les versions *sP*, *MM* i *Hc* també tendeixen a afavorir les descàrregues de les majors retencions volumètriques però ho fan de forma menys acusada que la versió *gP*, de manera que s'obté una major distribució de descàrregues entre les activitats industrials;
- per a un conjunt d'activitats industrials amb un gran volum d'aigua residual retinguda i amb lleugers augments de les concentracions de contaminants en relació als seus valors mitjans esperats (p.e. escenari 3), les versions *sP* i *gP* obtenen comportaments similars de descàrrega. Les diferències de comportament de descàrrega respecte de l'obtingut quan no es retenen grans volums (p.e. escenari de referència) són degudes a la tendència a afavorir les majors concentracions de contaminants quan les activitats industrials presenten els mateixos valors de

volums retinguts<sup>23</sup>. D'altra banda, les versions *MM* i *Hc* tendeixen a afavorir de manera més palesa, que en les versions *sP* i *gP*, les descàrregues provinents d'aigües residuals amb concentracions elevades dels contaminants  $x_3$ ,  $x_2$  i  $x_1$  per a almenys dos d'aquest contaminants;

- per a influents a l'EDAR, que poden presentar grans fluctuacions de concentració de contaminants, les descàrregues obtingudes amb la versió *gP*, obtenen la millor solució en termes de cost.

### ***Treball futur***

Les perspectives de una nova recerca, continuació del treball efectuat, inclouen, entre d'altres, els aspectes següents:

- incorporació al sistema de procediments d'argumentació,
- definició de les regles i realització dels estudis estadístics per tal de dotar l'agent Coordinador d'un sistema més complet d'adquisició de coneixement,
- definició dels procediments interns de l'agent EDAR, sense excloure la possibilitat d'adequar metodologies, comercialitzades o no, que hagin demostrat la seva eficàcia en la gestió del tractament,
- adaptació de la metaheurística ACO a d'altres problemàtiques relacionades amb sobrecàrregues a l'EDAR (p.e. regulació de *first flush* en sistemes integrats de clavegueram).

## ANNEX I. Escenaris alternatius del cas d'estudi ACO

Taula I.1. Escenari alternatiu 2

ESCENARI 2											
<i>i</i>	$\bar{X}_i^r$ (g/m <sup>3</sup> )					$C_i^r$ (g/m <sup>3</sup> )					$L_i$ (m <sup>3</sup> )
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	
1	200	150	1010	19	9	314	420	1740	18	2	100
2	300	350	500	25	13	600	400	600	20	18	200
3	500	100	850	5	0	900	200	2100	10	0	500
4	750	500	850	40	0	1300	1000	1900	60	0	2000
5	650	750	800	90	10	1300	1100	1300	180	20	200
6	100	700	800	20	0	200	1400	1800	20	0	700
7	650	750	800	35	15	1140	1200	1520	70	24	500
8	610	100	740	0	0	1340	200	1700	0	0	200
9	50	20	200	2	0	80	40	300	4	0	300
10	167	171	433	2	1	1200	640	980	4	2	200
11	64	249	623	40	4	80	540	1240	86	12	3000
12	300	415	670	5	1	1100	990	1140	26	4	400
13	950	188	375	12	4	250	270	1040	8	2	300
14	350	200	500	15	2	750	360	680	14	0	100
15	180	95	810	30	1	400	1100	1600	46	8	700
16	300	800	940	35	6	300	700	1080	76	4	2000
17	760	620	1150	5	0	520	840	1100	30	0	500
18	160	360	580	90	7	360	620	960	80	10	500
19	565	690	950	20	1	730	780	1100	20	4	100
20	600	750	800	10	15	1000	1000	1400	4	20	100
21	600	750	800	10	15	1224	900	1360	20	0	500
22	700	1300	2325	20	10	996	1400	1620	100	24	100
23	500	600	950	50	15	1012	1340	1640	100	10	400
24	500	800	1000	50	15	452	1700	1860	20	4	100
25	300	400	650	20	0	360	700	1100	60	36	1000



Taula I.2. Escenari alternatiu 3

ESCENARI 3											
$i$	$\bar{X}_i^r$ (g/m <sup>3</sup> )					$C_i^r$ (g/m <sup>3</sup> )					$L_i$ (m <sup>3</sup> )
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	
1	200	150	1010	19	9	157	210	870	9	1	1000
2	300	350	500	25	13	300	200	300	10	9	1000
3	500	100	850	5	0	450	100	1050	5	0	1000
4	750	500	850	40	0	650	500	950	30	0	1000
5	650	750	800	90	10	650	550	650	90	10	1000
6	100	700	800	20	0	100	700	900	10	0	1000
7	650	750	800	35	15	570	600	760	35	12	1000
8	610	100	740	0	0	670	100	850	0	0	1000
9	50	20	200	2	0	40	20	150	2	0	1000
10	167	171	433	2	1	600	320	490	2	1	1000
11	64	249	623	40	4	40	270	620	43	6	1000
12	300	415	670	5	1	550	495	570	13	2	1000
13	950	188	375	12	4	125	135	520	4	1	1000
14	350	200	500	15	2	375	180	340	7	0	1000
15	180	95	810	30	1	200	550	800	23	4	1000
16	300	800	940	35	6	150	350	540	38	2	1000
17	760	620	1150	5	0	260	420	550	15	0	1000
18	160	360	580	90	7	180	310	480	40	5	1000
19	565	690	950	20	1	365	390	550	10	2	1000
20	600	750	800	10	15	500	500	700	2	10	1000
21	600	750	800	10	15	612	450	680	10	0	1000
22	700	1300	2325	20	10	498	700	810	50	12	1000
23	500	600	950	50	15	506	670	820	50	5	1000
24	500	800	1000	50	15	226	850	930	10	2	1000
25	300	400	650	20	0	180	350	550	30	18	1000

## ANNEX II. Escenaris dels cicles, segon i successius, d'execució de l'agent Coordinador

Taula II.1. Escenari del cicle 2 d'execució de l'agent Coordinador

CICLE 2											
					$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$		
A. Domèstiques	$L_D$	(m <sup>3</sup> )	7000	$C_D^r$	(g/m <sup>3</sup> )	215	205	430	35	7	
Meteorologia	$L_M$	(m <sup>3</sup> )	0	$C_M^r$	(g/m <sup>3</sup> )	0	0	0	0	0	
EDAR	$V_T$	(m <sup>3</sup> )	21000	$V_T C_T^r$	(Kg)	9870	8610	13440	1575	357	
Activitats Industrials											
$i$	$L_i$ (m <sup>3</sup> )	$\bar{X}_i^r$ (g/m <sup>3</sup> )					$C_i^r$ (g/m <sup>3</sup> )				
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
1	200	200	150	1010	19	9	340	212	1007	17	9
2	200	300	350	500	25	13	310	240	410	17	10
3	1000	500	100	850	5	0	440	114	860	5	0
4	2000	750	500	850	40	0	690	520	890	34	0
5	400	650	750	800	90	10	630	505	740	70	8
6	700	100	700	800	20	0	90	680	850	15	4
7	1000	650	750	800	35	15	600	590	800	32	13
8	200	610	100	740	0	0	610	90	820	0	0
9	600	50	20	200	2	0	30	19	170	2	0
10	200	167	171	433	2	1	500	220	485	2	2
11	4000	64	249	623	40	4	45	257	601	40	5
12	400	300	415	670	5	1	490	470	575	10	2
13	600	950	188	375	12	4	320	120	465	9	1
14	100	350	200	500	15	2	380	190	420	10	0
15	700	180	95	810	30	1	203	510	780	27	4
16	2000	300	800	940	35	6	170	360	570	35	3
17	600	760	620	1150	5	0	294	452	723	12	0
18	500	160	360	580	90	7	173	326	487	47	4
19	200	565	690	950	20	1	377	408	586	15	2
20	100	600	750	800	10	15	536	598	768	2	11
21	700	600	750	800	10	15	620	523	716	12	10
22	100	700	1300	2325	20	10	672	998	1760	47	12
23	800	500	600	950	50	15	473	606	810	42	4
24	100	500	800	1000	50	15	390	845	962	18	6
25	1500	300	400	650	20	0	195	316	672	27	10

Taula II.2. Escenari del cycle 3 d'execució de l'agent Coordinador

CICLE 3											
					$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$		
A. Domèstiques	$L_D$	( $m^3$ )	5500	$C_D^r$	( $g/m^3$ )	200	200	430	40	7	
Meteorologia	$L_M$	( $m^3$ )	0	$C_M^r$	( $g/m^3$ )	0	0	0	0	0	
EDAR	$V_T$	( $m^3$ )	19000	$V_T C_T^r$	(Kg)	9880	7980	12350	1425	285	
Activitats Industrials											
$i$	$L_i$ ( $m^3$ )	$\bar{X}_i^r$ ( $g/m^3$ )					$C_i^r$ ( $g/m^3$ )				
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
1	100	200	150	1010	19	9	300	190	950	15	10
2	100	300	350	500	25	13	320	260	430	26	12
3	700	500	100	850	5	0	497	140	880	4	0
4	1800	750	500	850	40	0	695	530	860	37	0
5	300	650	750	800	90	10	660	490	770	65	7
6	800	100	700	800	20	0	87	685	810	13	2
7	800	650	750	800	35	15	630	610	900	34	15
8	300	610	100	740	0	0	605	87	790	0	0
9	400	50	20	200	2	0	29	17	190	8	0
10	200	167	171	433	2	1	400	195	450	2	2
11	5000	64	249	623	40	4	43	250	590	40	6
12	400	300	415	670	5	1	460	445	560	11	1
13	500	950	188	375	12	4	390	131	423	9	1
14	200	350	200	500	15	2	340	205	471	14	0
15	800	180	95	810	30	1	190	430	750	35	5
16	2000	300	800	940	35	6	160	390	622	35	3
17	700	760	620	1150	5	0	323	463	850	10	0
18	500	160	360	580	90	7	168	291	520	45	4
19	200	565	690	950	20	1	411	495	724	17	1
20	200	600	750	800	10	15	610	664	803	2	9
21	700	600	750	800	10	15	597	446	791	14	10
22	100	700	1300	2325	20	10	780	1114	2213	41	14
23	500	500	600	950	50	15	484	638	960	45	15
24	100	500	800	1000	50	15	433	822	970	36	8
25	1000	300	400	650	20	0	179	344	648	22	9

Taula II.3. Escenari del cicle 4 d'execució de l'agent Coordinador

CICLE 4												
					$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$			
A. Domèstiques	$L_D$	(m <sup>3</sup> )	7000	$C_D^r$	(g/m <sup>3</sup> )	230	210	440	40	6.5		
Meteorologia	$L_M$	(m <sup>3</sup> )	200	$C_M^r$	(g/m <sup>3</sup> )	420	290	490	20	4		
EDAR	$V_T$	(m <sup>3</sup> )	20000	$V_T C_T^r$	(Kg)	11200	9200	13200	1400	280		
Activitats Industrials												
$i$	$L_i$ (m <sup>3</sup> )	$\bar{X}_i^r$ (g/m <sup>3</sup> )					$C_i^r$ (g/m <sup>3</sup> )					
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	
1	200	200	150	1010	19	9	280	175	960	12	9	
2	200	300	350	500	25	13	290	288	465	24	15	
3	800	500	100	850	5	0	512	105	837	3	2	
4	1900	750	500	850	40	0	739	490	840	40	0	
5	200	650	750	800	90	10	650	480	755	68	8	
6	700	100	700	800	20	0	95	673	790	12	0	
7	800	650	750	800	35	15	640	700	860	34	15	
8	200	610	100	740	0	0	640	92	750	0	0	
9	400	50	20	200	2	0	35	22	176	7	0	
10	200	167	171	433	2	1	500	180	460	4	1	
11	4000	64	249	623	40	4	52	242	580	37	4	
12	500	300	415	670	5	1	380	420	580	6	1	
13	300	950	188	375	12	4	370	158	387	11	3	
14	200	350	200	500	15	2	347	240	484	12	2	
15	800	180	95	810	30	1	193	420	648	35	5	
16	2000	300	800	940	35	6	185	407	625	34	3	
17	800	760	620	1150	5	0	354	457	890	12	0	
18	500	160	360	580	90	7	172	339	536	61	4	
19	200	565	690	950	20	1	510	537	719	22	0	
20	300	600	750	800	10	15	617	710	852	4	13	
21	500	600	750	800	10	15	584	435	798	14	10	
22	100	700	1300	2325	20	10	775	1390	2400	41	12	
23	600	500	600	950	50	15	460	591	942	45	17	
24	100	500	800	1000	50	15	450	789	955	43	8	
25	1000	300	400	650	20	0	167	329	656	19	4	

Taula II.4. Escenari del cicle 5 d'execució de l'agent Coordinador

CICLE 5											
					$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$		
A. Domèstiques	$L_D$	( $m^3$ )	8000	$C_D^r$	( $g/m^3$ )	245	205	450	35	7	
Meteorologia	$L_M$	( $m^3$ )	200	$C_M^r$	( $g/m^3$ )	240	190	310	10	3	
EDAR	$V_T$	( $m^3$ )	22000	$V_T C_T^r$	(Kg)	10560	10230	14960	1540	264	
Activitats Industrials											
$i$	$L_i$ ( $m^3$ )	$\bar{X}_i^r$ ( $g/m^3$ )					$C_i^r$ ( $g/m^3$ )				
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
1	100	200	150	1010	19	9	160	160	902	10	9
2	300	300	350	500	25	13	305	310	490	19	12
3	700	500	100	850	5	0	501	107	830	6	2
4	2100	750	500	850	40	0	750	470	815	38	0
5	200	650	750	800	90	10	610	530	780	71	9
6	700	100	700	800	20	0	97	679	785	13	0
7	700	650	750	800	35	15	650	660	850	31	12
8	200	610	100	740	0	0	590	85	710	15	7
9	500	50	20	200	2	0	37	20	190	5	0
10	100	167	171	433	2	1	210	190	430	2	1
11	4000	64	249	623	40	4	60	248	470	35	3
12	700	300	415	670	5	1	340	419	583	5	1
13	300	950	188	375	12	4	355	156	376	9	2
14	100	350	200	500	15	2	350	213	479	15	2
15	900	180	95	810	30	1	176	367	662	40	5
16	2000	300	800	940	35	6	204	382	621	33	5
17	800	760	620	1150	5	0	365	469	950	12	0
18	500	160	360	580	90	7	165	365	539	58	5
19	100	565	690	950	20	1	552	583	755	20	0
20	200	600	750	800	10	15	594	805	904	14	16
21	500	600	750	800	10	15	589	512	820	15	15
22	100	700	1300	2325	20	10	612	1310	2296	29	9
23	500	500	600	950	50	15	465	575	866	40	15
24	100	500	800	1000	50	15	425	795	996	49	10
25	1000	300	400	650	20	0	171	355	650	19	1

Taula II.5. Escenari del cycle 6 d'execució de l'agent Coordinador

CICLE 6												
					$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$			
A. Domèstiques	$L_D$	(m <sup>3</sup> )	6000	$C_D^r$	(g/m <sup>3</sup> )	205	170	420	40	7		
Meteorologia	$L_M$	(m <sup>3</sup> )	100	$C_M^r$	(g/m <sup>3</sup> )	120	130	220	10	2		
EDAR	$V_T$	(m <sup>3</sup> )	20500	$V_T C_T^r$	(Kg)	12095	9430	14555	1517	328		
Activitats Industrials												
$i$	$L_i$ (m <sup>3</sup> )	$\bar{X}_i^r$ (g/m <sup>3</sup> )					$C_i^r$ (g/m <sup>3</sup> )					
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	
1	100	200	150	1010	19	9	179	145	893	11	8	
2	200	300	350	500	25	13	277	305	504	22	11	
3	500	500	100	850	5	0	460	99	815	5	0	
4	2000	750	500	850	40	0	760	480	830	41	0	
5	200	650	750	800	90	10	590	590	792	70	9	
6	600	100	700	800	20	0	110	682	790	13	0	
7	600	650	750	800	35	15	620	630	780	29	10	
8	300	610	100	740	0	0	610	88	706	12	4	
9	600	50	20	200	2	0	42	19	195	5	0	
10	300	167	171	433	2	1	190	170	440	2	0	
11	3000	64	249	623	40	4	55	237	504	40	4	
12	600	300	415	670	5	1	320	415	590	6	1	
13	200	950	188	375	12	4	360	164	380	12	3	
14	100	350	200	500	15	2	359	196	487	16	4	
15	1000	180	95	810	30	1	171	340	654	29	2	
16	2000	300	800	940	35	6	211	431	650	35	5	
17	900	760	620	1150	5	0	367	474	960	7	2	
18	500	160	360	580	90	7	158	357	544	55	5	
19	100	565	690	950	20	1	574	606	960	26	0	
20	100	600	750	800	10	15	589	693	805	12	17	
21	500	600	750	800	10	15	603	609	875	15	13	
22	100	700	1300	2325	20	10	698	1277	2309	30	10	
23	500	500	600	950	50	15	527	589	870	47	15	
24	100	500	800	1000	50	15	517	813	1200	58	10	
25	2000	300	400	650	20	0	214	336	635	15	0	

Taula II.6. Escenari del cicle 7 d'execució de l'agent Coordinador

CICLE 7												
					$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$			
A. Domèstiques	$L_D$	(m <sup>3</sup> )	5000	$C_D^r$	(g/m <sup>3</sup> )	230	175	440	40	8		
Meteorologia	$L_M$	(m <sup>3</sup> )	0	$C_M^r$	(g/m <sup>3</sup> )	0	0	0	0	0		
EDAR	$V_T$	(m <sup>3</sup> )	19900	$V_T C_T^r$	(Kg)	11542	8756	13532	1393	259		
Activitats Industrials												
$i$	$L_i$ (m <sup>3</sup> )	$\bar{X}_i^r$ (g/m <sup>3</sup> )					$C_i^r$ (g/m <sup>3</sup> )					
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	
1	200	200	150	1010	19	9	165	140	871	12	11	
2	200	300	350	500	25	13	283	360	570	23	12	
3	500	500	100	850	5	0	473	95	710	5	0	
4	2200	750	500	850	40	0	710	440	805	35	0	
5	300	650	750	800	90	10	620	650	786	73	9	
6	700	100	700	800	20	0	95	689	800	17	0	
7	500	650	750	800	35	15	625	590	750	27	11	
8	200	610	100	740	0	0	570	80	715	9	1	
9	400	50	20	200	2	0	44	19	200	2	0	
10	200	167	171	433	2	1	170	175	425	1	0	
11	3000	64	249	623	40	4	65	239	490	42	4	
12	500	300	415	670	5	1	290	410	601	5	1	
13	400	950	188	375	12	4	316	166	375	9	3	
14	100	350	200	500	15	2	340	190	492	14	2	
15	900	180	95	810	30	1	185	350	659	27	2	
16	2000	300	800	940	35	6	196	415	670	35	5	
17	800	760	620	1150	5	0	341	480	927	7	2	
18	500	160	360	580	90	7	156	352	553	56	8	
19	100	565	690	950	20	1	533	575	1002	31	4	
20	100	600	750	800	10	15	595	620	776	10	15	
21	500	600	750	800	10	15	607	665	962	19	15	
22	100	700	1300	2325	20	10	639	1103	2064	27	10	
23	400	500	600	950	50	15	519	594	895	55	13	
24	100	500	800	1000	50	15	505	827	1049	60	11	
25	1800	300	400	650	20	0	253	413	629	17	0	

Taula II.7. Escenari del cicle 8 d'execució de l'agent Coordinador

CICLE 8											
					$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$		
A. Domèstiques		$L_D$	(m <sup>3</sup> )	5000	$C_D^r$	(g/m <sup>3</sup> )	250	190	445	40	6
Meteorologia		$L_M$	(m <sup>3</sup> )	0	$C_M^r$	(g/m <sup>3</sup> )	0	0	0	0	0
EDAR		$V_T$	(m <sup>3</sup> )	20000	$V_T C_T^r$	(Kg)	11200	9000	14000	1400	320
Activitats Industrials											
$i$	$L_i$ (m <sup>3</sup> )	$\bar{X}_i^r$ (g/m <sup>3</sup> )					$C_i^r$ (g/m <sup>3</sup> )				
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
1	100	200	150	1010	19	9	172	150	868	9	9
2	200	300	350	500	25	13	290	346	540	25	13
3	700	500	100	850	5	0	454	103	755	4	0
4	1800	750	500	850	40	0	707	445	810	30	5
5	300	650	750	800	90	10	630	640	803	75	10
6	700	100	700	800	20	0	95	695	788	15	0
7	500	650	750	800	35	15	570	650	750	31	10
8	200	610	100	740	0	0	550	90	705	0	0
9	300	50	20	200	2	0	49	20	187	2	0
10	200	167	171	433	2	1	160	175	409	1	0
11	5000	64	249	623	40	4	62	241	480	38	5
12	400	300	415	670	5	1	295	415	587	5	2
13	300	950	188	375	12	4	340	161	404	8	3
14	200	350	200	500	15	2	326	186	497	14	2
15	1000	180	95	810	30	1	179	366	682	29	1
16	2000	300	800	940	35	6	173	354	623	36	6
17	800	760	620	1150	5	0	350	502	970	5	1
18	500	160	360	580	90	7	152	368	561	44	8
19	200	565	690	950	20	1	495	560	978	30	4
20	100	600	750	800	10	15	603	676	749	10	16
21	1000	600	750	800	10	15	578	710	903	13	9
22	100	700	1300	2325	20	10	651	965	1690	27	12
23	400	500	600	950	50	15	442	560	897	46	10
24	100	500	800	1000	50	15	430	760	916	60	10
25	1000	300	400	650	20	0	220	387	641	20	0



Taula II.8. Escenari del cycle 9 d'execució de l'agent Coordinador

CICLE 9											
					$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$		
A. Domèstiques		$L_D$	( $m^3$ )	5000	$C_D^r$	( $g/m^3$ )	250	195	440	35	7
Meteorologia		$L_M$	( $m^3$ )	0	$C_M^r$	( $g/m^3$ )	0	0	0	0	0
EDAR		$V_T$	( $m^3$ )	20800	$V_T C_T^r$	(Kg)	10816	8944	13520	1664	312
Activitats Industrials											
$i$	$L_i$ ( $m^3$ )	$\bar{X}_i^r$ ( $g/m^3$ )					$C_i^r$ ( $g/m^3$ )				
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
1	100	200	150	1010	19	9	180	155	890	10	7
2	300	300	350	500	25	13	298	330	537	18	10
3	600	500	100	850	5	0	461	90	660	4	0
4	1700	750	500	850	40	0	715	422	815	33	3
5	200	650	750	800	90	10	570	590	760	69	9
6	800	100	700	800	20	0	105	697	789	15	0
7	500	650	750	800	35	15	550	670	760	29	10
8	300	610	100	740	0	0	540	94	710	0	0
9	500	50	20	200	2	0	50	20	185	2	0
10	200	167	171	433	2	1	170	168	426	1	0
11	3000	64	249	623	40	4	60	230	470	35	4
12	400	300	415	670	5	1	300	417	574	4	1
13	300	950	188	375	12	4	395	170	429	9	2
14	100	350	200	500	15	2	332	191	489	15	1
15	900	180	95	810	30	1	167	344	708	29	1
16	2000	300	800	940	35	6	180	357	630	35	5
17	700	760	620	1150	5	0	373	488	864	5	0
18	500	160	360	580	90	7	160	360	515	40	10
19	100	565	690	950	20	1	517	574	970	19	3
20	200	600	750	800	10	15	585	640	760	12	13
21	1000	600	750	800	10	15	569	752	950	12	10
22	100	700	1300	2325	20	10	597	902	1515	20	8
23	500	500	600	950	50	15	405	587	865	46	10
24	100	500	800	1000	50	15	428	754	928	55	6
25	1000	300	400	650	20	0	222	390	660	21	0

Taula II.9. Escenari del cycle 10 d'execució de l'agent Coordinador

CICLE 10												
					$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$			
A. Domèstiques	$L_D$	(m <sup>3</sup> )	7000	$C_D^r$	(g/m <sup>3</sup> )	210	180	450	40	7		
Meteorologia	$L_M$	(m <sup>3</sup> )	100	$C_M^r$	(g/m <sup>3</sup> )	130	110	210	10	2		
EDAR	$V_T$	(m <sup>3</sup> )	20000	$V_T C_T^r$	(Kg)	10000	8000	12600	1500	300		
Activitats Industrials												
$i$	$L_i$ (m <sup>3</sup> )	$\bar{X}_i^r$ (g/m <sup>3</sup> )					$C_i^r$ (g/m <sup>3</sup> )					
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	
1	200	200	150	1010	19	9	201	170	905	9	6	
2	200	300	350	500	25	13	305	295	542	12	7	
3	700	500	100	850	5	0	452	90	640	3	0	
4	2000	750	500	850	40	0	720	409	820	34	0	
5	200	650	750	800	90	10	550	450	730	76	9	
6	700	100	700	800	20	0	100	700	780	12	0	
7	600	650	750	800	35	15	600	650	750	25	9	
8	400	610	100	740	0	0	540	95	690	0	0	
9	300	50	20	200	2	0	50	20	190	2	0	
10	400	167	171	433	2	1	170	160	420	1	0	
11	3000	64	249	623	40	4	65	235	530	35	3	
12	400	300	415	670	5	1	305	410	582	5	1	
13	400	950	188	375	12	4	402	167	473	10	2	
14	100	350	200	500	15	2	339	185	488	12	0	
15	700	180	95	810	30	1	173	350	715	30	1	
16	2000	300	800	940	35	6	194	362	638	34	5	
17	900	760	620	1150	5	0	368	496	876	5	0	
18	500	160	360	580	90	7	162	354	520	52	8	
19	200	565	690	950	20	1	549	599	994	17	1	
20	100	600	750	800	10	15	529	591	732	9	13	
21	500	600	750	800	10	15	580	757	904	20	15	
22	100	700	1300	2325	20	10	610	886	1010	20	10	
23	400	500	600	950	50	15	411	580	870	45	13	
24	100	500	800	1000	50	15	441	730	925	50	6	
25	1400	300	400	650	20	0	218	351	655	18	0	



## **Bibliografia**

- [1] Folke C, Carpenter SR, Walker B, Scheffer M, Chapin T, Rockström J. Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and Society*. 2010; 15(4):20. URL:<http://www.ecologyandsociety.org/vol15/iss4/art20/>
- [2] Directive 2000/60/CE of the European Parliament and the Council Establishing a Framework for Community Action in the Field of Water Policy. OJ L 327 de 22.12.2000; 0001-0073.
- [3] Comas J, Poch M, Rodríguez-Roda I, Cortés U, Sánchez-Marré M. Eleven years of experience in designing and building real environmental decision support systems. Universitat de Girona, 2002.
- [4] Poch M, Comas J, Rodríguez-Roda I, Sánchez-Marré M, Cortés U. Designing and building real environmental decision support systems. *Environmental Modelling & Software*. 2004; 19:857-873.
- [5] Devesa F, Comas J, Turón C, Freixó A, Carrasco F, Poch M. Scenario analysis for the role of sanitation infrastructures in integrated urban wastewater management. *Environmental Modelling & Software*. 2009; 24:371-380.
- [6] Benedetti L, Dirckx G, Bixio D, Thoeye C, Vanrolleghem PA. Environmental and economic performance assessment of the integrated urban wastewater system. *Journal of Environmental Management*. 2008; 88:1262-1272.
- [7] Schmitt TG, Huber WC. The scope of integrated modelling: System boundaries, sub-systems, scales and disciplines. *Water Science and Technology*. 2006; 54:405-413.
- [8] Vanrolleghem PA, Benedetti L, Meirlaen J. Modelling and real-time control of the integrated urban wastewater system. *Environmental Modelling & Software*. 2005; 20:427-442.
- [9] Butler D, Schütze M. Integrating simulation models with a view to optimal control of urban wastewater systems. *Environmental Modelling & Software*. 2005; 20:415-426.

- [10] Erbe V, Frehmann T, Geiger WF, Krebs P, Londong J, Rosenwinkel KH, Seggelke K. Integrated modelling as an analytical and optimisation tool for urban watershed management. *Water Science and Tecnology*. 2002; 46:141-150.
- [11] Meirlaen J, Van Assel J, Vanrolleghem PA. Real time control of the integrated urban wastewater system using simultaneously simulating surrogate models. *Water Science and Technology*. 2002; 45:109-116.
- [12] Kobbacy KAH, Vadera S, Rasmy MH. AI and OR in management of operations: history and trends. *Journal of the Operational Research Society*. 2007; 58:10-28.
- [13] Nwana HS. Software agents: An overview. *Knowledge Engineering Review*. 1996; 11:205-244.
- [14] Wooldridge M. Agent-based software engineering. *IEE Proceedings Software Engineering*. 1997; 144:26-37.
- [15] Jennings NR. On agent-based software engineering. *Artificial Intelligence*. 2000; 117:277-296.
- [16] Russell SJ, Norvig P. *Artificial intelligence a modern approach*. Prentice Hall Series in Artificial Intelligence. Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, USA, 2003.
- [17] Sycara KP. Multiagent systems. *AI Magazine*. 1998; 19(2):79-92.
- [18] Zambonelli F, Omicini A. Challenges and research directions in agent-oriented software engineering. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. 2004; 9:253-283.
- [19] Cortes U, Poch M. *Advanced agent-based environmental management systems*. Whitestein Series in Software Agent Technologies, Birkhäuser Verlag, Basel. 2009.
- [20] Wooldridge M, Jennings NR, Kinny D. The Gaia methodology for agent-oriented analysis and design. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. 2000; 3:285-312.
- [21] Zambonelli F, Jennings NR, Wooldridge M. Developing multiagent systems: The Gaia methodology. *ACM transactions on Software Engineering and Methodology*. 2003; 12:317-370.

- [22] Dorigo M, Di Caro G. Ant colony optimization: a new meta-heuristic. In the Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation CEC99. 6-9 July. Washington DC, USA. 1999: 1470-1477.
- [23] Verdaguer, M, Clara, N, Poch, M. Ant colony optimization-based method for managing industrial influents in wastewater systems. *AICHE Journal*. 2012; 58: 3070-3079.
- [24] Stützle T, Hoos HH. Max-Min Ant System. *Future Generation Computer Systems*. 2000; 16:889-914.
- [25] Blum C, Roli A, Dorigo M. HC-ACO: the hyper-cube framework for ant colony optimization. In the Proceedings of the MIC'2001-4th Metaheuristics International Conference. Porto, Portugal, 16-20 July, 2001, 399-403.
- [26] Beck MB. Dynamic modelling and control applications in water quality maintenance. *Water Research*. 1976; 10:575-595.
- [27] Lijklema L, Tyson JM. Urban water quality: Interactions between sewers, treatment plants and receiving waters. *Water Science and Technology*. 1993; 27:29-33.
- [28] Vanrolleghem PA. Evaluation of design and operation of the sewage transport and treatment system by an EQO/EQS based analysis of the receiving water immission characteristics. In the Proceedings of the WEF Conference Urban Wet Weather Pollution. June,1996; 14.35-14.46.
- [29] Rauch W, Aalderink H, Krebs P, Schilling W, Vanrolleghem P. Requirements for integrated wastewater models-driven by receiving water objectives. *Water Science and Technology*. 1998; 11:97-104.
- [30] Seggelke K, Rosenwinkel KH, Vanrolleghem PA, Krebs P. Integrated operation of sewer system and WWTP by simulation-based control of the WWTP inflow. *Water Science and Technology*. 2005; 52:195-203.
- [31] Meirlaen J, Huyghebaert B, Sforzi F, Benedetti L, Vanrolleghem P. Fast, simultaneous simulation of the integrated urban wastewater system using mechanistic surrogate models. *Water Science and Technology*.2001; 43:301-309.

- [32] Schütze M, Campisano A, Colas H, Schilling W, Vanrolleghem PA. Real time control of urban wastewater systems-where do we stand today? *Journal of Hydrology*. 2004; 299:335-348.
- [33] Erbe V, Risholt LP, Schilling W, Londong J. Integrated modelling for analysis and optimisation of wastewater systems-the Odenthal case. *Urban Water*. 2002; 4:63-71.
- [34] Erbe V, Schütze M. An integrated modelling concept for immission-based management of sewer system, wastewater treatment plant and river. *Water Science and Technology*. 2005; 52:95-103.
- [35] Benedetti L, Blumensaat F, Bönisch G, Dirckx G, Jardin N, Krebs P, Vanrolleghem PA. Systems analysis of urban wastewater systems-two systematic approaches to analyse a complex system. *Water Science and Technology*. 2005; 52:171-179.
- [36] Muschalla D, Schütze M, Schroeder K, Bach M, Blumensaat F, Gruber G, Klepyszewski K, Pabst M, Pressl A, Schindler N, Solvi AM, Wiese J,. The HSG procedure for modelling integrated urban wastewater systems. *Water Science and Technology*. 2009; 60:2065-2075.
- [37] Council Directive 91/271/EEC. DO L 135 de 30.5.1991.
- [38] Council Directive 96/61/EC. DO L 257 de 10.10.1996.
- [39] Real Decreto 1664/1998. BOE 191 de 11.08.1998.
- [40] Decret Legislatiu 3/2003. DOGC 4015 de 21.11.03.
- [41] Decret 380/2006. DOGC 4740 de 16.10.2006.
- [42] Acord Gov/238/2010. DOGC 5766 de 30.11.2010.
- [43] Resolució MAH/2370/2006. DOGC 4679 de 19.7.2006.
- [44] Resolució MAB/2964/2003. DOGC 3986 de 13.10.2003.
- [45] Cortés U, Sánchez-Marrè M, Ceccaroni L. Artificial Intelligence and Environmental Decision support Systems. *Applied Intelligence*. 2000; 13:77-91.

- [46] Makropoulos CK, Natsis K, Liu S, Mittas K, Butler D. Decision support for sustainable option selection in integrated urban water management. *Environmental Modelling & Software*. 2008; 23:1448-1460.
- [47] Benedetti L, Prat P, Nopens I, Poch M, Turon C, De Baets B, Comas J. A new rule generation method to develop a decision support system for integrated management at river basin scale. *Water Science and Technology*. 2009; 60:2035-2040.
- [48] Weiss G. *Multiagent Systems: a modern approach to distributed artificial intelligence*. MIT Press. 1999.
- [49] Jennings NR. An agent-based approach for building complex systems. *Communications of the ACM*. 2001; 4-41.
- [50] Castelfranchi C. Modelling social action for AI agents. *Artificial Intelligence*. 1998; 103:157-182.
- [51] Mataric MJ. Issues and approaches in the design of collective agents. *Robotics and Autonomous Systems*. 1995; 16:321-331.
- [52] Zambonelli F, Jennings NR, Wooldridge M. Organisational rules as an abstraction for the analysis and design of multi-agent systems. *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*. 2001; 303-328.
- [53] Tchobanoglous G, Burton FL, Stensel HD. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. Metcalf&Eddy, Inc. 4th ed. Boston: McGraw-Hill; 2003.
- [54] Jenkins D., Richard MG, Daigger GT. *Manual on the Causes and Control of Activated Sludge Bulking, Foaming and Other Solids Separation Problems*. 3rd ed. London, U.K: IWA Publishing; 2004.
- [55] Henze M, Van Loosdrecht MCM, Ekama GA, Brdjanovic D. *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*. London, U.K: IWA Publishing; 2008.
- [56] Wang YP, Smith R. Design of distributed effluent treatment systems. *Chemical Engineering Science*. 1994; 49:3127-3145.



- [57] Kuo W, Smith R. Effluent treatment System design. *Chemical Engineering Science*. 1997; 52:4273-4290.
- [58] Galan B, Grossmann IE. Optimal design of distributed wastewater treatment networks. *Industrial Engineering Chemistry Research*. 1998; 37:4036-4048.
- [59] Lee S, Grossmann IE. Global optimization of nonlinear generalized disjunctive programming with bilinear equality constraints: Applications to process networks. *Computers and Chemical Engineering*. 2003; 27:1557-1575.
- [60] Meyer CA, Floudas CA. Global optimization of a combinatorial complex generalized pooling problem. *AIChE Journal*. 2006; 52:1027-1037.
- [61] Karuppiah R, Grossmann IE. Global optimization for the synthesis of integrated water Systems in chemical processes. *Computers and Chemical Engineering*. 2006; 30:650-673.
- [62] Wooldridge M, Jennings NR. *Intelligent agents: theory and practice*. *The Knowledge Engineering Review*. 1995; 10:115-152.
- [63] Barbuceanu M. Role of obligations in multiagent coordination. *Applied Artificial Intelligence*. 1999; 13:11-38
- [64] Kinny D, Georgeff M, Rao A. A methodology and modelling technique for Systems of BDI agents. *Lecture Notes in Computer Science*. 1996; 1038:56-71.
- [65] DeLoach SA, Wood MF, Sparkman CH. Multiagent Systems engineering. *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*. 2001; 3:231-258.
- [66] Wood MF, DeLoach SA. An overview of the multiagent Systems methodology. *Proceedings of the First International Workshop on Agent-oriented Software Engineering*. June 2000, Limerick, Ireland. *Lecture Notes in Computer Science*. 2000; 1957:207-221.
- [67] Bresciani P, Perini A. Tropos: an agent-oriented software development methodology. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. 2004; 8:203-236.

- [68] Padgham L, Winikoff M. Prometheus: A methodology for developing intelligent agents. *Lecture Notes in Computer Science*. 2003; 2585:174-185.
- [69] Sturm A, Shehory O. A comparative evaluation of agent-oriented methodologies. *Methodologies and software engineering for agent Systems*. 2004; 11(II):127-149.
- [70] Sturm A, Shehory O. A framework for evaluating agent-oriented methodologies. *Lecture Notes in Computer Science*. 2004; 3030:94-109.
- [71] Juan T, Pearce A, Sterling L. Roadmap: Extending the Gaia methodology for complex open Systems. *Proceedings of the International Conference on Autonomous Agents*. 2002; 2:3-10.
- [72] Cernuzzi L, Cossentino M, Zambonelli F. Process models for agent-based development. *Engineering Applications of Artificial Life*. 2005; 18:205-222.
- [73] Aulinas M, Nieves JC, Poch M, Cortés U. Supporting decision making in urban wastewater Systems using a knowledge-based approach. *Environmental Modelling and Software*. 2011; 5:562-573.
- [74] Kellerer H, Pferschy U, Pisinger D. *Knapsack problems*. Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, 2004.
- [75] Fréville A. The multidimensional 0-1 knapsack problem: An overview. *European Journal of Operational Research*. 2004; 155:1-21.
- [76] Alaya I. Ant algorithm for the multidimensional knapsack problem. *International Conference on bioinspired optimization methods BIOMA 2004*. Ljubljana, Slovenia, 11-12 Octobre 2004; 63-72.
- [77] Martello S, Pisinger D, Toth P. New trends in exact algorithms for the 0-1 knapsack problem. *European Journal of Operational Research*. 2000; 123:325-332.
- [78] Pisinger D. Where are the hard knapsack problems? *Computers & Operations Research*. 2005; 32:2271-2284.
- [79] Jukna S, Schnitger G. Yet harder knapsack problems. *Theoretical Computer Science*. 2011; 412:6351-6358.

- [80] Fréville A, Hanafi S. The multidimensional 0-1 knapsack problem- bounds and computational aspects. *Annals of Operations Research*. 2005; 139:195-227.
- [81] Glover, F.; Kochenberger, G.A. *Handbook of metaheuristics*. International Series in Operations Research & Management Science. Springer. 2003.
- [82] Glover F, Taillard E, Taillard E. A user's guide to tabu search. *Annals of Operations Research*. 1993; 1:1-28.
- [83] Voß S. Meta-heuristics: the state of the art. *Lecture Notes in Computer Science*. 2001; 2148:1-23.
- [84] Blum C, Roli A. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*. 2003; 35:268-308.
- [85] Lourenço HR, Martin OC, Stützle T. Iterated Local Search in *Handbook of Metaheuristics*. International Series in Operations Research and Management Science. 2003; 57:320-353.
- [86] Kirkpatrick S, Gelatt CD, Vecchi MP. Optimization by simulated annealing. *Science*. 1983; 4598:671-680.
- [87] Kicinger R, Arciszewski T, De Jong K. Evolutionary computation and structural design: a survey of the state-of-the-art. *Computers and Structures*. 2005; 83:1943-1978.
- [88] Zlochin M, Dorigo M. Model-based search for combinatorial optimization: A comparative study. *Parallel Problem Solving from Nature, PPSN VII*. *Lecture Notes in Computer Science*. 2002; 2439:651-661.
- [89] Zlochin M, Birattari M, Meuleau N, Dorigo M. Model-based search for combinatorial optimization: a critical survey. *Annals of Operations Research*. 2004; 131:373-395.
- [90] Bianchi L, Dorigo M, Gambardella LM, Gutjahr WJ. A survey on metaheuristics for stochastic combinatorial optimization. *Natural Computing*. 2009; 8:239-287.
- [91] Dorigo M, Di Caro G. The ant colony optimization meta-heuristic. *New Ideas in Optimization*. In: D. Corne, M. Dorigo and F. Glover editors. McGraw-Hill, 1999.

- [92] Dorigo M, Stützle T. The ant colony optimization metaheuristic: algorithms, applications and advances. In Handbook of metaheuristics. International Series in Operations Research and Management Science. 2008; 57:250-285.
- [93] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. The ant system: optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B. 1996; 26:29-41.
- [94] Dorigo M, Stützle T. Ant colony optimization. Cambridge: MIT Press, 2004.
- [95] Blum C. Ant colony optimization: Introduction and recent trends. Physics of Life Reviews. 2005; 2:353-373.
- [96] Llei 15/2008. DOGC 5288 de 31desembre, 2008.
- [97] Dorigo M, Di Caro G, Gambardella LM. Ant algorithms for discrete optimization. Artificial Life. 1995; 5:137-172.
- [98] Cordon O, Herrera F, Stützle T. A review on the ant colony optimization metaheuristic: basis, models and new trends. Mathware &Soft Computing. 2002; 9:141-175.
- [99] Leguizamón G, Michalewicz Z. A new version of Ant System for subset problems. Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation CEC 99. Washington, USA, 6-9 July, 1999; 1459-1464.
- [100] Nahas N, Nourelfath M. Ant System for reliability optimization of a series System with multiple choice and budget constraints. Reliability Engineering and System Safety. 2005; 87:1-12.
- [101] Colomi A, Dorigo M, Maniezzo V. An investigation of some properties of an ant algorithm. In Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature PPSN 92. Brussels, Belgium. 1992; Elsevier Publishing,509-520
- [102] Colomi A, Dorigo M, Distributed Optimization by ant colonies. In Proceedings of ECAL91. European Conference on Artificial Life. Paris, France. 1991; Elsevier Publishing,134-142

- [103] Stützle T, Hoos H. *Max-Min* ant System and local search for the travelling salesman problem. In the Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation. 1997; 309-314.
- [104] Stützle T, Dorigo M. A short convergence proof for a class of ant colony optimization algorithms. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2002; 4:358-365.
- [105] Blum C. The hyper-cube framework for ant colony optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*. 2004; 34:1161-1172.
- [106] Birattari M, Pellegrini P, Dorigo M. On the invariance of ant colony optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2007; 6:732-742.
- [107] Gutjahr WJ. ACO algorithms with guaranteed convergence to the optimal solution. *Information Processing Letters*. 2002; 82:145-153.
- [108] Dorigo M, Blum C. Ant colony optimization theory: a survey. *Theoretical Computer Science*. 2005; 344:243-278.
- [109] Gutjahr WJ. On the finite-time Dynamics of ant colony optimization. *Methodology and Computing in Applied Probability*. 2006; 8:105-133.
- [110] Fidanova S, Atanassov K. ACO with semi-random start applied on MKP. *Proceedings of the International Multiconference on Computer Science and Information Technology IMCSIT 2010*. 2010; 5:887-891.
- [111] Stützle T, Hoos H. Max-Min Ant System and local search for combinatorial optimization problems. 2nd International Conference on metaheuristics-MIC97. 21-24 juliol, 1997 Sophia-Antipolis, France.
- [112] Michalewicz Z, Schouenauer M. Evolutionary algorithms for constrained parameter optimization problem. *Evolutionary Computation*. 1996; 4:1-32.
- [113] Afshar MH. Penalty adapting ant algorithm: application to pipe network optimization. *Engineering Optimization*. 2008; 40:969-987.

- [114] Coello CA. Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: a survey of the state of the art. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2002; 191:1245-1287.
- [115] Favaretto D, Moretti E, Pellegrini P. On the explorative behavior of Max-Min Ant System. *Lecture Notes in Computer Science*. 2009; 5752:115-119.
- [116] Pellegrini P, Favaretto D, Moretti E. On Max-Min Ant System's parameters. *Lecture Notes in Computer Science*. 2006; 4150:203-214.