

**EPS**

Escola Politècnica

Superior

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Química

Títol: Millora de les aportacions d'aigües residuals d'origen industrial a depuradora.

Document: Memòria

Alumne: Marc Cunill Cols

Director/Tutor: Marta Verdaguer Planas / Manel Poch Espallargas

Departament: EQATA

Àrea: Enginyeria Química

Convocatòria (mes/any): Setembre / 2014

AGRAÏMENTS

Als meus tutors i al professor N. Clara per la seva disponibilitat, assessorament i implicació en la realització del present treball.

Al professor responsable d'oficina tècnica per l'ajut i assessorament rebuts en la redacció d'aquest document.

Als meus pares i a la resta de la meva família, per tot el seu suport i paciència en els moments complicats.

I per últim, però no menys important, voldria agrair a tots els meus amics i a tota la gent que he conegut durant aquest temps a Girona, per les nombroses vegades que he passat al seu costat i pels ànims que he rebut per part seva.

ÍNDEX

1	Introducció	1
1.1	Antecedents	1
1.2	Objecte	1
1.3	Abast.....	1
2	El sistema d'aigües residuals.....	2
2.1	L'aigua residual.....	2
2.2	Sanejament	3
2.3	Sistemes de sanejament.....	3
2.3.1	Xarxes de clavegueram.....	3
2.3.2	Estació Depuradora d'Aigües Residuals (EDAR)	5
2.4	Programes de sanejament	10
2.4.1	PSARI	10
2.4.2	PSARU.....	11
2.5	Limitacions de la llei	11
2.5.1	Limitacions d'entrada.....	11
2.5.2	Limitacions de sortida	12
2.6	Tramitacions i normativa	14
2.6.1	A nivell domèstic	15
2.6.2	A nivell industrial.....	15
3	Optimització combinatòria.....	17
3.1	Optimització combinatòria.....	17
3.2	Metaheurístiques	18
3.2.1	Recuit simulat (Simulated annealing).....	18
3.2.2	Algorismes Evolutius (Evolutionary algorithms)	19
3.2.3	Eixam de partícules – Ant Colony.....	19
3.3	ACO: Ant Colony Optimization	20
3.3.1	Les colònies de formigues (reals)	20
3.3.2	Formigues artificials	22
3.4	Algorismes basats en la metaheurística ACO.....	23
3.4.1	Ant System:	24
3.4.2	Max – Min Ant System:	25
4	Metodologia	29
4.1	Cas d'estudi	29

4.2	Definició de les funcions heurístiques.....	34
4.2.1	Procés de prioritització de les descàrregues d'aigua residual.....	34
4.2.2	Formulacions per a la funció heurística	41
4.2.3	Execució de les simulacions	48
5	Resultats i discussions	50
5.1	Funció heurística 1	50
5.1.1	Evolució de costos	50
5.1.2	Evolució de la descàrrega d'aigua residual	53
5.2	Funció heurística 2	67
5.2.1	Evolució de costos	67
5.2.2	Evolució de la descàrrega d'aigua residual	70
5.3	Funció heurística 3	85
5.3.1	Evolució de costos	85
5.3.2	Evolució de la descàrrega d'aigua residual	88
5.4	Resum dels millors resultats obtinguts pels heurístic 1, 2 i 3	98
6	Resum del pressupost	99
7	Conclusions	100
8	Bibliografia	102
9	Glossari.....	106

1 INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

L'activitat de les indústries químiques genera aigües residuals que s'han de tractar de forma eficient en estacions depuradores per evitar alteracions del medi ambient. Algunes d'aquestes aigües poden ser tractades a les depuradores urbanes, que per evitar riscos estableixin uns límits als abocaments que reben. A vegades, la petició d'abocament per part de les empreses sobrepassa la capacitat de la depuradora i aleshores es sobrepasa la capacitat de la depuradora amb la qual cosa en disminueix la seva eficiència.

1.2 Objecte

L'objectiu del projecte és estudiar diferents criteris de prioritització per a veure quin és el que permet aprofitar al màxim la capacitat de la depuradora sense sobrepassar-ne els límits. S'utilitzarà un algorisme que es basa en el comportament de les formigues per trobar el menjar, i que sembla que pot ser adequat per aquest problema.

1.3 Abast

Per tal d'estudiar aquest problema s'haurà de definir un escenari amb empreses que generen aigües residuals i una depuradora urbana que les tractarà; també s'haurà de proposar diferents criteris de prioritització i traduir a fórmules matemàtiques de forma que es puguin programar; seguidament s'haurà de fer les simulacions sobre l'escenari definit; i per últim, analitzar els resultats obtinguts per tal de proposar quina és la millor solució.

2 EL SISTEMA D'AIGÜES RESIDUALS

2.1 L'aigua residual

Les aigües residuals són aquelles que han experimentat una alteració en la seva composició natural degut a la influència antropològica, tant d'activitats industrials, agrícoles com urbanes.

En general, es caracteritzen per contenir matèria orgànica, sòlids en suspensió, nutrients (principalment nitrogen i fòsfor), patògens i metalls pesants (Hg, Zn, Cu).

Les aigües residuals es poden definir com la combinació de líquids que transporten residus procedents de residències, instal·lacions públiques i centres comercials i industrials, a les quals, eventualment, es poden afegir aigües subterrànies, superficials i pluvials (1). La qualitat d'aquestes aigües recollides al clavegueram i que posteriorment arriben a les estacions depuradores d'aigües residuals (EDAR) està condicionada pel percentatge d'aigua residual industrial rebuda i la seva composició. Per evitar càrregues molt superiors a les càrregues amb què pot operar l'EDAR segons el seu disseny, així com l'arribada de substàncies tòxiques, els gestors dels sistemes de sanejament estableixen normatives per als abocaments industrials que limiten les concentracions de determinats paràmetres: MES (Matèries en Suspensió); DQO (Demanda Química d'Oxigen) per a la matèria orgànica; DBO (Demanda Biològica d'Oxigen); NT (Nitrogen Total), en forma d'amoni (NH_4^+), TKN (Nitrogen Total Kjeldhal), nitrits (NO_2^-) i nitrats (NO_3^-); i PT (Fòsfor Total) en forma de fosfats i ortofosfats (PO_4^{3-}).

Degut a la seva complexa composició i a la presència d'agents causants de malalties, aquestes es recullen i es tracten, mitjançant tractaments físics, químics i biològics, en Estacions Depuradores d'Aigües Residuals (EDAR) o depuradores abans de ser retornades al medi natural.

Dins de les aigües residuals s'obté una classificació depenent del medi del qual procedeixen. Es distingeixen aigües blanques (d'origen meteorològic sense presència de contaminants), aigües grises (d'origen domèstic com per exemple el rentat d'utensilis, de roba o també les dutxes) i, per últim, les aigües negres (contaminades amb substàncies procedents de deixalles orgàniques humanes o animals o bé amb contaminants industrials). Aquest últim tipus d'aigües residuals (principalment si són d'origen fecal) es caracteritzen per tenir una concentració més elevada de nitrogen i fòsfor.

2.2 Sanejament

La depuració de les aigües residuals és un procés que es produeix a la natura, espontàniament, en més o menys temps. La depuració, per tant, pot ser un procés natural. No obstant això, a la natura, el procés és lent. Les aigües residuals han de recórrer molts quilòmetres de riu per autodepurar-se. Aquest procés, entre altres problemes, consumeix oxigen, de forma que si la concentració és elevada pot afectar l'ecosistema fluvial. Així, si els abocaments són abundosos i el riu de poc cabal, com la majoria dels de Catalunya, el procés natural no podria arribar a depurar l'aigua, i llargs trams de riu serien tèrbols, contaminats i podrien perdre la majoria dels organismes que hi són habituals quan l'aigua està en bones condicions. Més que rius, esdevindrien clavegueres on un exemple es va poder observar al riu Besòs, que degut a que es troba situat en una zona altament poblada i industrialitzada, durant els anys 1970 – 1980 va esdevenir el riu més contaminat d'Europa.

El procés de depuració que es fa a la depuradora elimina de l'aigua gran part dels materials afegits durant el seu ús mitjançant una sèrie de tractaments, de forma que l'aigua que s'aboca al riu té ja unes condicions acceptables dins la llei que es mostraran més endavant al llarg d'aquest capítol.

2.3 Sistemes de sanejament

Per tal de transformar l'aigua residual generada en l'ús domèstic i en el nivell industrial en aigua apte per abocar al riu complint amb els límits establerts per la llei cal un sistema de sanejament. Aquests estan formats per xarxa de clavegueram (col·lectors, escomeses, canonades, bombaments, etc.), EDAR i medi receptor (riu, mar, etc.).

2.3.1 Xarxes de clavegueram

S'entén com a xarxa de clavegueram el sistema d'estructures i canonades que s'utilitza per la recollida i el transport de les aigües residuals d'origen domèstic, industrials i pluvials d'una població des del lloc en què es generen fins al lloc en què es tracten, generalment depuradores, per a no contaminar el medi ambient. Aquestes xarxes són estructures hidràuliques que generalment funcionen a pressió atmosfèrica, és a dir, per gravetat. No

obstant, en alguns trams breus, poden estar constituïdes per un conjunt de canonades que treballen sota pressió. Aquestes són constituïdes per conductes de secció circular i la majoria de vegades es localitzen enterrades sota les vies públiques. Si es classifica aquestes xarxes segons la seva estructura es pot trobar-ne de dos tipus, que tot seguit s'especifiquen a continuació (1).

- Xarxes unitàries: es construeixen per rebre un únic conducte on conflueixen tant les aigües residuals, les urbanes com les industrials, amb les aigües residuals pluvials.
- Xarxes separatives: consten de dos canalitzacions totalment independents. La primera s'utilitza per transportar les aigües residuals domèstiques i les industrials fins a una estació depuradora, mentre que en la segona xarxa s'utilitza per transportar les aigües pluvials fins al receptor, ja sigui riu, llac o mar.

Per altra banda s'esmenten els components principals d'una xarxa de clavegueram. Els més usuals es poden veure a continuació:

- Escumeses: conjunt d'elements que permeten incorporar a la xarxa de clavegueram les aigües residuals abocades per un edifici públic o un habitatge.
- Desguassos: sistemes dissenyats per drenar l'aigua bruta o de pluja. Els desguassos condueixen l'aigua residual cap a la xarxa de clavegueram per prevenir inundacions. El conducte d'entrada de l'aigua residual al desguàs rep el nom de boca de tempesta.
- Col·lectors: canonades de major secció que recullen les aigües dels desguassos i les condueixen als col·lectors principals. Els col·lectors es situen enterrats sota les vies públiques.
- Col·lectors principals: col·lectors més grossos de la població i reuneixen grans cabals d'aigua residual. Aquests transporten l'aigua residual fins a l'entrada de la depuradora.
- Interceptors: conduccions que transporten les aigües residuals reunides pels col·lectors fins a la depuradora, però en aquest cas amb un cabal regulat per l'existència d'una resclosa.

A part dels elements principals existeixen uns altres, els elements secundaris. Aquests també són importants, però no tant habituals en les xarxes de clavegueram:

- Embornals: estructures destinades a recol·lectar l'aigua pluvial i de neteja dels carrers.

- Cunetes: estructures destinades a recollir i concentrar les aigües pluvials de les vies interurbanes.
- Pous: cambres verticals que permeten l'accés a les clavegueres i als col·lectors per tal de facilitar el seu manteniment.
- Bombaments: degut a que la xarxa de clavegueram treballa per gravetat, per funcionar les canonades han de tenir una certa pendent per garantir a l'aigua residual una velocitat mínima que no permeti la sedimentació dels materials sòlids transportats. Ara bé, els pous poden arribar a tenir profunditats molt elevades, la qual cosa fa difícil el seu manteniment. En casos com el que acabem de descriure pot ser aconsellable intercalar a la xarxa estacions de bombament, que permeten elevar l'aigua servida a una cota pròxima a la cota del carrer o via.
- Línies d'impulsió: immediatament següent als bombaments, es situen unes canonades a pressió i que finalitza majoritàriament en un altre col·lector.

La tasca dels elements descrits anteriorment rau en la de recollir l'aigua residual (tant pluvial com la provinent d'usos domèstics i industrials) i conduir-la fins a l'entrada d'una Estació Depuradora d'Aigües Residuals per a ser tractada i retornada al medi natural.

2.3.2 Estació Depuradora d'Aigües Residuals (EDAR)

Una Estació Depuradora d'Aigües Residuals té com a objectiu aconseguir, a partir d'aigua residual, una aigua que es pot retornar al riu sense malmetre'l mitjançant processos físics, químics i biològics i rebaixant fins a les concentracions que marca la directiva 91/271/CEE els paràmetres que caracteritzen l'aigua.

La depuració d'aigües residuals hauria d'implicar l'eliminació dels components de l'aigua residual que poden causar perjudicis a la salut humana, la qualitat de les aigües i l'estat dels ecosistemes. La indicació principal és que les estacions depuradores d'aigües residuals han de ser eficients i fiables.

Per tal de controlar aquesta eficiència i fiabilitat, cal definir unes eines analítiques per a determinar uns paràmetres de control de la depuració. El tractament de les aigües residuals es produeix gràcies a la combinació de processos físics, químics i/o biològics en les estacions depuradores. El disseny de cadascuna d'aquestes operacions depèn del tipus d'aigua que s'ha

de tractar, de les seves característiques, del volum que s'ha de tractar i de la qualitat de l'efluent que es vol (1).

L'influent d'una Estació Depuradora d'Aigües Residuals standard segueix el següent recorregut: Pretractament, Tractament Primari, Tractament Secundari i Tractament Terciari que tenen com a objectiu reduir les concentracions dels paràmetres més destacats i anomenats anteriorment.

Pretractament

L'aigua que arriba a la depuradora s'anomena influent. En aquesta etapa s'eliminen els sòlids de mida gran mitjançant reixes i filtres, procés que normalment es desenvolupa a pressió ambiental. La finalitat principal d'aquesta etapa és la d'evitar possibles obturacions posteriors, a més a més es vol eliminar l'efecte abrasiu d'aquests materials sobre mecanismes com les bombes i vàlvules que es troben al llarg del procés. També s'eliminen olis i greixos, escumes o flocs que poden tenir les aigües residuals mitjançant la flotació. Tot seguit es continua amb el tractament primari.

Tractament Primari

Primerament en aquesta etapa es deixa reposar l'aigua residual en decantadors o sedimentadors. Aquest mecanisme s'anomena decantació i l'objectiu és la sedimentació de la matèria orgànica que és sedimentable, així com la resta de sorres o partícules inorgàniques que no han quedat retenudes en el pretractament. L'aigua circula a través del tanc, on es remou i s'aireja per mitjà de processos mecànics. Altres tractaments que complementen aquesta etapa són la precipitació que utilitza tancs de sedimentació per tal d'eliminar ions (per exemple Cu, Zn, Cr, Ni, Al, etc). Llavors, en cas que amb la precipitació no s'hagi eliminat la totalitat de la matèria, s'aplica la coagulació¹-floculació², on s'eliminen matèries en suspensió (MES) i la matèria orgànica particulada (MOP) mitjançant amb l'addició de substàncies

¹ Coagulació: Desestabilització de les partícules coloidals causades per l'addició d'un reactiu químic anomenat coagulant que fa que les partícules tendeixin a unir-se entre sí.

² Floculació: Aglomeració de partícules desestabilitzades en microflòculs i posteriorment en els flòculs més grans que tendeixen a dipositar-se en el fons dels recipients.

anomenades floculants, aglutinant-se les substàncies col·loïdals presents en l'aigua, facilitant-ne la seva decantació i posterior filtrat. Tot seguit es continua amb el tractament secundari.

Tractament Secundari

Aquesta és l'etapa de tipus biològic en una Estació Depuradora d'Aigües Residuals. A través dels microorganismes s'elimina la matèria orgànica i els nutrients. Consisteix en l'eliminació biològica fins als límits que marca la llei de matèria orgànica, nitrogen i fòsfor de les aigües residuals. S'utilitzen cicles aerobis (amb presència d'oxigen), anaerobis o anòxics (sense presència d'oxigen) o combinats. En els aerobis s'utilitzen principalment tancs de llots actius; els anaerobis tancs de biometanització; i, en cicles combinats es poden utilitzar cicles de tancs – SBR, carrusels d'oxidació o tancs de biomassa fixada, d'aquests se'n destaquen principalment els tancs biodiscs, el filtre percolador o el llacunatge, que es tracta d'un tractament biològic de depuració d'aigües residuals que consisteix a recollir els residus en llacunes i deixar-los reposar fins que la matèria orgànica que contenen s'estabilitza per descomposició bacteriana: acció oxidant natural dels microorganismes.

Els microorganismes presents als reactors són els mateixos que es troben en els sistemes naturals, però les condicions especials que es donen dins del bioreactor comporten la selecció de les espècies implicades en el procés. Els microorganismes es divideixen per mitosi cel·lular quan tenen un cert volum. En el cas de les depuradores, es reproduïxen seguint una funció de creixement exponencial, que s'anomena cinètica de Monod (1950).

Les poblacions microbianes poden ser mantingudes en un estat de creixement exponencial durant llarg temps utilitzant sistemes de cultiu continu. La velocitat de creixement dels bacteris és funció del nutrient limitant, ja que la velocitat d'addició del medi determina la velocitat de creixement bacterià i el sistema està regulat.

Tractament Terciari

Es coneix com a tractament terciari com a tots els tractaments físico-químics destinats a afinar algunes de les característiques de l'efluent provinent de la depuradora. En són algun exemple la utilització de carbó actiu o la cloració.

En el cas de les aigües residuals industrials, les operacions unitàries utilitzades en el sistema de tractament poden variar molt depenent de la composició de l'aigua residual. En la Taula 2.1 es mostra un resum de les operacions unitàries utilitzades segons el tipus de contaminant que s'ha d'eliminar de l'aigua residual.

Taula 2.1. Operacions unitàries utilitzades en el tractament d'aigües residuals.

Paràmetre contaminant (1)	Operació unitària o tractament
Sòlids en suspensió	Sedimentació
	Coagulació – Flocculació
	Filtració
Matèria orgànica biodegradable	Tractament biològic
	Sistemes fisicoquímics
Patògens	Oxidació química per cloració o ozonització
Nitrogen	Eliminació biològica per nitrificació i desnitrificació
	Intercanvi iònic
Fòsfor	Precipitació química amb clorur fèrric o càlcic

Una vegada la depuradora ha realitzat la seva funció podem abocar l'aigua tractada al medi receptor.

Arreu de tot el món és necessari l'ús d'Estacions Depuradores d'Aigües Residuals. Només a nivell de Catalunya n'hi ha en funcionament prop de 460. A continuació es mostra un mapa indicant la seva localització.



Figura 2.1. Il·lustració de les EDAR a nivell de Catalunya, ACA (any 2012).

A la Figura 2.1 s'observen les EDAR a nivell de Catalunya fent especial èmfasi a la seva localització, ja que es situen al voltant de grans rius, com ara l'Ebre, el Llobregat o el Ter. També s'observa un major nombre de depuradores al voltant de les quatre capitals de província catalanes.

Paral·lelament als tractaments, les fases de decantació generen una elevada quantitat de sòlids, anomenats fangs o llots, que necessiten un tractament específic per reduir-ne el volum, el pes i les característiques. Aquesta nova seqüència de processos s'engloba en una nova línia de tractament, la línia de fangs, que sol constar d'un espessiment, una estabilització i una deshidratació final. A nivell de Catalunya existeixen plantes d'assecatge tèrmic i plantes de compostatge. Una vegada el fang està desestabilitzat el podem destinar a jardineria o bé per recuperació del terreny, entre d'altres.

Per tal d'entendre el procés d'una forma gràfica es mostra un esquema de l'Estació Depuradora d'Aigües Residuals.

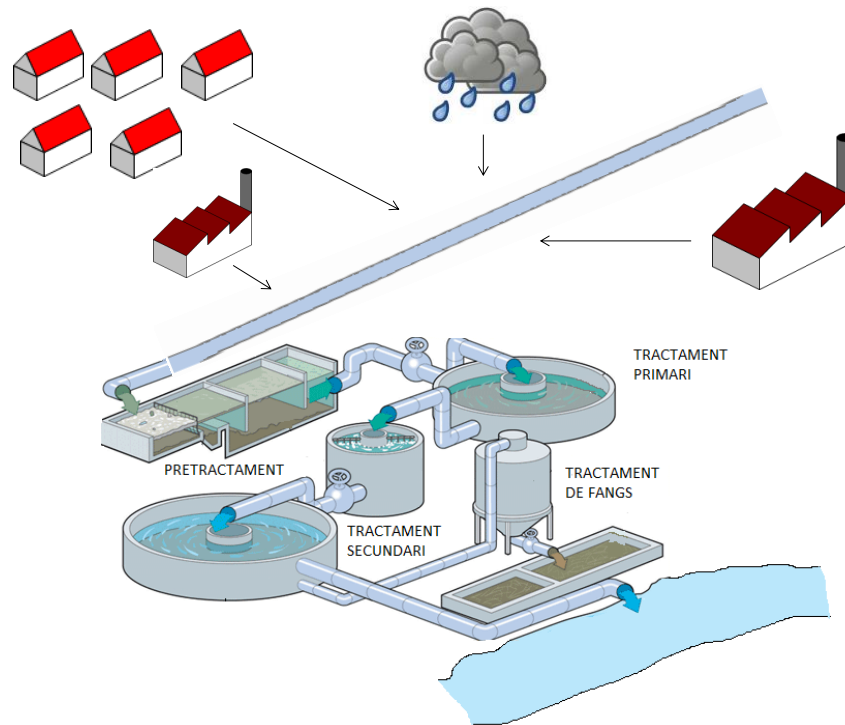


Figura 2.2. Representació gràfica d'una EDAR, *mundociencias* (2).

A la Figura 2.2 s'observa que la font d'entrada d'aigua a la EDAR pot ser tant per via meteorològica, urbana o industrial que es tracta del que s'estudiarà all llarg d'aquest present treball. S'observa també que, una vegada el corrent d'aigua d'entrada ha superat els equips de la EDAR, l'aigua resultant presenta unes característiques que la fan apte per a ser retornada al medi natural.

2.4 Programes de sanejament

Per tal de regular els abocaments de càrregues contaminants al medi ambient es segueixen diferents programes de sanejament de les aigües residuals (3).

2.4.1 PSARI

El PSARI correspon al Programa de Sanejament d'Aigües Residuals Industrials (3). Aquest programa s'encarrega de la millora de la qualitat dels abocaments d'establiments industrials,

considerant els paràmetres bàsics de contaminació: MES, DQO, sals solubles, matèries inhibidores, nitrogen i fòsfor.

El principal objectiu del PSARI – 2003, que fa referència a la darrera data d'actualització, és la reducció de les emissions d'altres substàncies contaminants, o bé de contaminants específics. A més a més, aquest programa estableix les bases per a un control exhaustiu d'aquestes substàncies identificades i regulades.

El programa tracta d'explicitar un model de relacions, comportaments i actuacions per acomodar l'escenari per tal de fer una utilització eficient de les infraestructures de sanejament amb la responsabilitat pròpia del sector industrial d'eliminar la contaminació que generen els seus processos.

2.4.2 PSARU

El PSARU correspon al Programa de Sanejament d'Aigües Residuals Urbanes (3). Aquest programa té com a objectiu la definició de totes les actuacions destinades a la reducció de les càrregues contaminants en les aigües residuals originades per l'ús domèstic, permetent l'assoliment dels objectius de la qualitat de l'aigua. A través d'aquest programa es vol aconseguir un bon estat de l'aigua superficial amb el desenvolupament de mesures de protecció, millora i regeneració.

2.5 Limitacions de la llei

Per tal de regular els efluents tractats o residuals a qualsevol medi públic la directiva 91/271/CEE (4) regula les condicions per evitar contaminacions.

2.5.1 Limitacions d'entrada

La directiva europea 91/271/CEE estableix les limitacions d'abocament d'aigües residuals de les Estacions Depuradores d'Aigües Residuals i els percentatges mínims de reducció que han

de tenir. En la Taula 2.2 que es mostra a continuació es presenten concentracions màximes d'entrada permeses per tal de complir amb la Directiva:

Taula 2.2. Requeriments per a entrada d'aigües residuals urbanes a EDAR.

Paràmetre contaminant	Límit abocament (mg/L)
MES (Sòlids en Suspensió)	750
DBO (Demanda Bioquímica d'Oxigen)	750
DQO (Demanda Química d'Oxigen)	1500
NT (Nitrogen Total)	100
PT (Fòsfor Total)	50

Les aigües residuals urbanes es classifiquen en dèbils, mitjanes i fortes segons la concentració que tenen. En la Taula 2.3 es mostren aquestes concentracions:

Taula 2.3. Nivells de concentració d'aigües residuals domèstiques.

Paràmetre contaminant (5)	Concentració equivalent (mg/L)		
	Dèbils	Mitjanes	Fortes
MES (Sòlids en Suspensió)	100	220	350
DBO (Demanda Bioquímica d'Oxigen)	110	220	400
DQO (Demanda Química d'Oxigen)	250	500	1000
NT (Nitrogen Total)	20	40	85
PT (Fòsfor Total)	4	8	15

Es pot observar que els valors de la taula 2.3 són inferiors als de la taula 2.2, per tant les aigües residuals domèstiques es poden abocar a la xarxa de clavegueram municipal.

2.5.2 Limitacions de sortida

La directiva europea 91/271/CEE també estableix les concentracions màximes d'abocament de diferents paràmetres dels efluent depurats a la llera pública. En la taula 2.4 es mostren les concentracions màximes permeses.

Taula 2.4. Requeriments per a descàrregues d'aigües residuals urbanes segons la Directiva Europa 91/271/CEE.

Paràmetre contaminant (4)	Límit abocament (mg/L)	Percentatge mínim de reducció
MES (Sòlids en Suspensió)	35	90%
DBO (Demanda Bioquímica d'Oxigen)	25	70-90%
DQO (Demanda Química d'Oxigen)	125	75%
NT (Nitrogen Total)	15	70-80%
PT (Fòsfor Total)	2	80%

Un factor que s'ha de tenir en compte és el de les activitats industrials que sobrepassen els límits que marca la llei 91/271/CEE de concentracions màximes permeses a abocar d'aigua residual a la xarxa de clavegueram municipal. El que han de fer és disposar d'una depuradora pròpia de la indústria o una de conjunta amb altres indústries si està situada en un polígon industrial. En aquest tipus de depuradores el què es fa és transformar l'aigua residual de les indústries en aigua residual apta per a ser poder tractada en una Estació Depuradora d'Aigües Residuals. Generadores d'aquest tipus d'aigua són: escorxadors, indústries farmacèutiques, químiques, càrniques, papereres, tèxtils, lleteres, entre d'altres.

A la taula 2.5 es pot observar algun exemple d'activitats industrials generadores d'aigües residuals.

Taula 2.5. Exemple de composicions d'aigües residuals generades en diferents tipus d'activitats industrials.

Tipus d'activitat industrial	Concentració (mg/L)				
	MES	DBO	DQO	NT	PT
Alimentària (escorxador) (6)	422	500	986	78	22
Alimentària (cafè) (7)	299	1245	1659	95	20
Alimentària (cervesera) (8)	150	400	600	78	33
Alimentària (gelats) (9)	96	50	67	9	2
Alimentària (lletera) (10)	237	570	1487	14	10
Alimentària (vins i caves) (11)	50	25	125	10	5
Alimentària (oli d'oliva) (12)	725	550	1276	16	2
Tèxtil (fils i teixits) (13)	130	300	1040	25	2
Tèxtil (llana) (13)	200	350	1000	25	5
Tèxtil (acabats i fibres) (13)	75	250	800	60	14
Paperera (impressió) (14)	30	580	1060	70	6
Paperera (fàbrica de paper) (14)	130	360	990	89	1
Química (indeterminada) (15)	70	20	100	9	2
Química (biocides i colorants) (16)	10	96	184	2	2
Química (refineria) (17)	90	40	200	90	10
Farmacèutica (indeterminada) (18)	100	66	99	10	2
Farmacèutica (drogues sintètiques) (19)	39	754	1604	120	3
Farmacèutica (vitamines) (16)	100	70	133	7	1
Sector de l'acer (20)	100	30	250	50	4
Sector de l'automòbil (21)	65	24	156	19	1
Efluent parc industrial (21)	224	373	1267	60	11
Efluent parc industrial tractat amb ozonització (22)	110	191	410	21	4

2.6 Tramitacions i normativa

Tota activitat industrial, comercial o habitatge genera aigües residuals. El cost que genera transformar aquestes aigües en aigües aptes per a retornar al medi s'ha de remunerar mitjançant el cànon de l'aigua i altres tributs. El cànon de l'aigua va entrar en vigor l'1 d'abril del 2000, i està regulat pel Decret legislatiu 3/2003, del 4 de novembre, pel qual s'aprova el text de la legislació en matèria d'aigües de Catalunya.

Mitjançant aquest cànon els usuaris de l'aigua contribueixen als costos dels serveis del cicle de l'aigua, com per exemple:

- i. Les despeses d'inversió i d'explotació dels sistemes de sanejament (col·lectors, bombaments i estacions depuradores), dels embassaments i de la resta d'infraestructures de producció i transport de l'aigua.
- ii. La recuperació dels aquífers contaminats, les obres d'instal·lació d'infraestructures d'abastament en alta a municipis, i les instal·lacions de reutilització d'aigua.
- iii. La prevenció en origen de la contaminació, i la implantació i manteniment dels cabals ecològics.

2.6.1 A nivell domèstic

En l'aplicació de la normativa del cànon de l'aigua als usos domèstic es consideren quatre trams de consum diferents, amb un mínim de facturació de 6 m³ per abonat i mes. El tipus de gravamen (€/m³) que s'aplica depèn del volum d'aigua consumida, fet que té com a finalitat fomentar l'ús eficient de l'aigua i afavorir la reducció dels consums d'aigua més elevats. Amb tot aquest tipus es pot veure afectat per a coeficients reductors.

2.6.2 A nivell industrial

En l'aplicació de la normativa del cànon de l'aigua als usos industrials es consideren la presentació de la declaració d'ús i contaminació de l'aigua (DUCA). La DUCA, abreujada o bàsica, té un període de validesa de quatre anys i s'ha de renovar durant l'últim trimestre natural de l'últim any de validesa. Això vol dir que, si un establiment presenta la DUCA l'any X, cal que presenti la següent entre l'1 d'octubre i el 31 de desembre de l'any X+4.

Els usuaris industrials i assimilables amb un consum anual d'aigua superior a 7000 m³ han de presentar la DUCA, l'activitat econòmica dels quals es trobi inclosa en els codis A032, B, C i D de la Classificació Catalana d'Activitats Econòmiques (CCAEE-2009), o bé si tenen un consum entre 1000 m³ i 7000 m³, i en l'aigua presenten una concentració de matèria oxidable superior a 750 mg/L i/o sòlids en suspensió a 500 mg/L, o tenen aigües no abocades que suposen més del 50% de les consumides, o bé els usuaris que, tot i no complir els requisits anteriors, rebin un requeriment exprés de l'Agència Catalana de l'Aigua.

El model abreujat és la forma més senzilla de declaració i correspon als establiments que no han d'especificar la càrrega contaminant dels seus abocaments de forma individualitzada d'acord amb el codi CCAE. Per contra, el model bàsic correspon als establiments que han de declarar de forma individualitzada la càrrega contaminant de les aigües residuals abocades.

El CCAE juntament amb el Decret legislatiu 3/2003 es defineixen els usos de l'aigua. Domèstics, agrícoles i assimilables, ramaders i assimilables i, industrials i assimilables. La liquidació del cànon als usuaris industrials i assimilables varia en funció del tipus de tarifació que se'ls aplica i de la procedència del subministrament, ja siguin fonts pròpies o l'entitat subministradora. Els usuaris amb tarifació individualitzada també han de declarar trimestralment a l'ACA mitjançant la B6, en els vint dies següents a cada trimestre natural, els seus consums procedents de la seva entitat subministradora, juntament amb els de fonts pròpies, si és que en tenen, declarant les lectures dels comptadors d'aigua.

El cànon de l'aigua dels usuaris industrials i assimilables pot ser liquidat per l'entitat subministradora d'aigua a la mateixa factura de l'aigua o bé per l'Agència Catalana de l'Aigua (ACA) depenent del tipus de tarifació aplicat i de la procedència del subministrament.

Els valors de base per volum per a usos domèstics i industrials i assimilables i el valor de cada unitat de paràmetre de contaminació del cànon de l'aigua establert a l'any 2009, per tal de determinar el tipus de gravamen específic d'una manera individualitzada, sense comptar l'impost sobre el valor afegit es mostren en la Taula 2.6.

Taula 2.6. Import del cànon de l'aigua establert al Decret DOGC 5288 a efectes domèstics i industrials.

Paràmetre contaminant (23)	Import (€/kg)
MES (Sòlids en Suspensió)	0.3980
DQO (Demanda Química d'Oxigen)	1.1945
NT (Nitrogen Total)	0.6145
PT (Fòsfor Total)	1.2092

3 OPTIMITZACIÓ COMBINATÒRIA

3.1 Optimització combinatòria

El problema de les descàrregues d'aigües residuals industrials a una única depuradora es pot entendre com a un problema d'optimització combinatòria. Es tenen un conjunt d'aigües residuals cadascuna de les quals es pot caracteritzar per la seva composició, la qual engloba un conjunt de components. La optimització de la seva combinació presenta característiques similars al problema genèric informàtic anomenat problema de la motxilla (24). Per aquest problema, es disposa d'una sèrie d'objectes de diferent pes i preu. Cadascun d'ells s'han d'introduir a l'interior d'una motxilla, la qual és incapaç de suportar més d'un pes determinat, fixat inicialment. Els objectes col·locats en la motxilla han de maximitzar el valor total sense excedir el pes màxim. Pel cas objecte d'aquest estudi la motxilla seria l'equivalent a la depuradora, mentre que els objectes que cal introduir-hi serien les diferents aigües residuals industrials.

Així doncs la combinació d'aigües residuals que ha de compondre l'influent de l'EDAR constitueix un problema que no té una fàcil solució utilitzant procediments de càlcul exactes, sinó que requereix procediments que tinguin capacitat per a resoldre el problema de la motxilla, és a dir, una optimització combinatòria amb les restriccions que imposa la mateixa depuradora.

En general, un problema d'optimització combinatòria $POC = (S, \Omega, f)$ està definit per:

- un conjunt de variables $X = (x_1, \dots, x_n)$
- dominis de variables $D_1, \dots, D_n$
- un conjunt de restriccions Ω entre les variables
- una funció objectiu f :

Considerant tot el que s'ha exposat anteriorment, el problema plantejat, es resol per mètodes metaheurístics.

Aquests mètodes permeten resoldre els problemes amb un temps raonable. Per contra, no resolten amb la millor solució sinó amb una solució aproximada a l'òptima, però que satisfà les condicions del problema.

3.2 Metaheurístiques

El terme metaheurística fou introduït per Fred Glover (25) i consta de la composició de dues paraules gregues. El sufix *meta* significa “més allà de, en un nivell superior” i heurística prové del verb *heuriskein* que significa “trobar, descobrir”. Per tal de definir aquesta paraula ho podem fer de moltes formes, però una de les més acceptades és la que es mostra al llibre (26): *“Una metaheurística es defineix formalment com un procés de generació iteratiu el qual guia a una heurística subordinada combinant intel·ligentment diferents conceptes per explotar l’espai de cerca. En aquest mètode de treball són utilitzades estratègies d’aprenentatge per estructurar la informació amb l’objectiu de trobar solucions òptimes a problemes d’una forma eficient”* (26).

Per resumir, es pot dir que les metaheurístiques són estratègies d’alt nivell per explorar espais de cerca de solucions utilitzant diferents mètodes.

Les metaheurístiques incorporen conceptes de molts i diversos camps. En són algun exemple la genètica, la biologia, les matemàtiques, la física o la neurologia, entre d’altres. Alguns exemples de metaheurístiques són: Recuit Simulat, Procediments Evolutius, Eixam de partícules, etc.

Els algorismes es poden entendre com a especificacions concretes dels procediments metaheurístics.

En general totes les variants dels mètodes metaheurístics probabilístics utilitzen un únic punt de partida, amb excepció del recuit simulat, fan evolucionar una solució inicial pertorbant aleatòriament els paràmetres a optimitzar. Alguns dels passos d’aquest tipus d’algorisme es troben en funció de valors pseudoaleatoris. Dins dels algorismes probabilístics es distingeixen també varis tipus:

3.2.1 Recuit simulat (Simulated annealing)

Són la imitació a nivell computacional del procés físic a seguir per obtenir sòlids amb configuracions d’energia mínima.

Conceptualment és un mètode de recerca per entorns, en el què el criteri d'elecció són les regles de transició de l'algorisme de Metròpolis que selecciona aleatòriament un candidat entre els que componen l'entorn de la solució actual; si el candidat és el millor s'accepta; sinó, s'accepta amb certa probabilitat.

Es considera que un dels avantatges del mètode és que el procés convergeix asimptòticament cap a la solució òptima amb probabilitat 1, és a dir, que sempre s'arribarà a la solució òptima, encara que sigui després d'infinites iteracions.

3.2.2 Algorismes Evolutius (Evolutionary algorithms)

Basats en una població o conjunt de solucions potencials, els quals es sotmeten a un procés iteratiu, utilitzant diferents esquemes, operadors i estratègies en funció del tipus d'algorisme.

Se'n destaquen els algorismes genètics, basats en els principis de la selecció i evolució natural, es fa evolucionar la població en base a la pressió que exerceixen els operadors de selecció, creuament i mutació. La població es divideix en subconjunts i es recombinen per donar una sèrie de descendents. Cada fill és sotmès a una mutació i els més aptes són finalment escollits per formar la nova població. Com que els pares no s'inclouen en la generació següent poden tenir una nova generació amb pitjors aptituds que l'anterior obtenint així un moviment que permet sortir d'òptims locals.

3.2.3 Eixam de partícules – Ant Colony

En l'optimització amb eixam de partícules, la població té memòria, és a dir, l'optimització es dirigeix i encamina influïda per la història passada, per la memòria de cada individu i per l'estat present en el que cada un es troba. Es tracta d'un mètode probabilístic d'optimització global que es basa en imitar a nivell computacional el comportament d'un col·lectiu a partir de la interacció entre els seus membres i amb el seu entorn. Aquest és el que s'utilitza específicament en el present estudi, per la qual cosa tot seguit es presenta amb detall.

3.3 ACO: Ant Colony Optimization

Els algorismes d'optimització basats en Colònies de Formigues van ser proposats per a primera vegada per Dorigo *et al.* (27), (28) com un mètode per resoldre problemes d'optimització combinatòria durs. Els algorismes d'optimització basats en colònies de formigues són part de la branca de intel·ligència col·lectiva, el camp de la investigació que estudia algorismes inspirats en l'observació del comportament dels eixams i colònies. Aquests algorismes estan compostats per individus simples que treballen conjuntament mitjançant l'auto-organització, és a dir, sense cap forma de control central sobre els membres de la colònia.

ACO està inspirat en la observació del comportament de les formigues reals. Al llarg d'aquest capítol es presenten observacions fetes en experiments amb formigues i com a partir d'aquest exemple es va inspirar el disseny d'aquest procediment.

3.3.1 Les colònies de formigues (reals)

Les formigues reals són insectes que viuen en colònies i el seu comportament està dirigit més cap a la supervivència de la colònia que no pas a la supervivència d'una individual. Molts científics han mostrat interès per estudiar el seu comportament i l'estructura que formen les seves colònies, especialment la simplicitat amb què duen a terme el seu comportament.

Un dels primers científics en investigar el comportament social dels insectes va ser l'entomòleg francès Pierre-Paul Grassé (28). Entre els anys 40 i 50 es va dedicar a observar el comportament de les termites. Descobrí (29) que aquests insectes són capaços de reaccionar al què s'anomena "estímuls significants", els quals són senyals que activen una reacció codificada genèticament. Observà (30) que els efectes d'aquestes reaccions poden actuar com a nous estímuls significants, tant per l'insecte que les produeix com per altres insectes de la colònia. Grassé utilitzà el terme estigmergia³, per descriure aquest tipus particular de comunicació indirecta en la qual els membres de la colònia són estimulats per la tasca que han aconseguit.

Exemples d'estigmergia poden ser observats en el comportament de les colònies de formigues. Moltes espècies de formigues, mentre transiten des del niu fins a una font d'alimentació i

³ Estigmergia: La paraula estigmergia deriva de les paraules gregues *stigma* (marca, senyal) i *ergon* (treball, acció).

viceversa, dipositen en el terreny una substància anomenada feromona. Altres formigues poden olorar aquesta substància, i la seva presència influeix en l'elecció del camí a recórrer. La feromona dipositada al terreny forma el que es coneix com a rastre de feromona, el qual permet a les formigues trobar bones fonts de menjar que prèviament han estat identificades per altres formigues.

Aquest comportament de dipositar feromona al terreny va ser investigat per alguns científics. Un dels que ho va fer va ser Deneubourg (31), que va dissenyar un experiment anomenat "experiment del pont binari". Utilitzà formigues del tipus *Linepithema humile* i connectà el niu de les formigues a una font de menjar mitjançant dos ponts d'igual longitud. Les formigues podien escollir per quin dels dos ponts passar. Aquest comportament va ser estudiat durant un període de temps.

Inicialment en aquest experiment, no hi ha feromona en cap dels dos ponts. Les formigues comencen a explorar el voltant del niu i aleatòriament creuen un dels dos ponts, arribant a la font de menjar. Durant el trajecte, les formigues dipositen feromona en el pont que han utilitzat. Al cap d'una estona hi haurà més feromona dipositada en un dels dos ponts que en l'altre. Com que les formigues tendeixen a preferir el rastre de feromona més fort (en més concentració), el pont que més feromona tingui, més formigues s'atrauran i més formigues hi passaran. De forma que, finalment, el rastre de feromona creixerà fins a que tota la colònia de formigues farà ús del mateix pont.

Això demostra el comportament de la colònia. El conjunt de les formigues explotaran per trobar el camí més curt entre el niu i la font de menjar. Aquest fenomen va ser dirigit per Goss *et al.* (32) i demostraren que la longitud dels dos ponts no era igual, sinó que un dels ponts era més llarg que l'altre. Les fluctuacions aleatòries sobre la opció inicial d'un dels dos ponts varen ser més reduïdes i arribaren a la conclusió que com els dos ponts eren de dimensions diferents, les formigues de la colònia utilitzaren el pont més petit per anar des del niu fins a la font de menjar augmentant així el rastre de feromona.

3.3.2 Formigues artificials

Estimulat per els resultats interessants descrits en la secció anterior, Goss *et al.* (28), (32) desenvoluparen un model per explicar el comportament observat en l'experiment dels dos ponts.

Aquest model pot ser utilitzat com una inspiració per dissenyar formigues artificials que resolguin problemes d'optimització. Algunes característiques coincideixen entre les formigues artificials i les formigues reals, no obstant això presenten diferències significatives. Es presenten a continuació les característiques més importants de les formigues artificials.

Les formigues artificials estan constituïdes per entitats computacionals simples, que en un principi es mouen aleatòriament per un espai de recerca de solucions.

Al igual que les formigues naturals, interaccionen i col·laboren per solucionar una determinada tasca. Tant unes com les altres, modifiquen el seu entorn a través d'una comunicació estimergètica basada en la feromona. Les formigues deixen un rastre de feromones en el camí de tornada quan en el seu trajecte han aconseguit arribar al menjar, és a dir, en trobar la solució correcta. Presenten preferència per seguir el camí amb rastre de feromones, enfront d'un camí sense rastre, de forma que cada vegada hi ha més formigues seguint el mateix trajecte i per tant la concentració de feromones és més elevada. És a dir, en les formigues artificials, tenen preferència pels camins que troben solucions i en aquest cas, els rastres de feromona artificials són valors numèrics que estan disponibles únicament de manera local.

El camí més seguit des del niu de formigues, és a dir, l'estat inicial fins al menjar o la solució (a l'entorn virtual) a través del rastre de feromona és preferentment el trajecte més curt.

Les formigues artificials construeixen les solucions iterativament aplicant una estratègia de transició local probabilística per moure's entre estats adjacents, al igual que ho fan les formigues reals.

Les principals diferències entre els tipus de formigues es mostren a continuació:

- Les formigues artificials poden seguir una heurística de decisió en la política estocàstica de transició d'estat que apliquen, que constitueix un ajut per trobar una solució diferent al rastre de feromona.

- Les formigues artificials tenen una memòria que emmagatzema el camí seguit per la formiga.
- La quantitat de feromona dipositada per la formiga artificial és funció de la qualitat de la solució trobada, permetent dipositar aquesta substància després de generar una solució completa. A una solució de més qualitat li correspon una major deposició de feromona.
- Per evitar que l'algorisme es quedi estancat en òptims locals s'ha d'incloure el mecanisme d'evaporació de la feromona.

Amb el fenomen de l'evaporació de la feromona es permet que la colònia de formigues artificials obliidi lentament la seva memòria per tal de redirigir la seva recerca cap a noves regions de l'espai de cerca de solucions, amb la qual cosa s'evita un estancament prematur de l'algorisme en un òptim local.

3.4 Algoritmes basats en la metaheurística ACO

Els algoritmes d'Optimització basats en Colònies de Formigues (ACO) es defineixen com una tècnica d'optimització metaheurística, basada en el comportament de les colònies de formigues reals, per tal d'obtenir una solució òptima.

Els algoritmes d'Optimització basats en Colònies de Formigues foren formalitzats en una metaheurística d'optimització combinatoria per Dorigo *et al.* (33) i des de llavors han estat utilitzats per resoldre molts Problemes d'Optimització Combinatòria (POC). La resolució d'un POC es pot portar a terme mitjançant un algorisme ACO. El primer pas per l'aplicació d'un algoritme ACO consisteix en definir un model adequat i posteriorment definir el component central dels algoritmes ACO, en aquest cas, el model de la feromona. A continuació es mostra a la Figura 3.1 de forma esquemàtica el procediment de resolució que segueix un algorisme ACO.

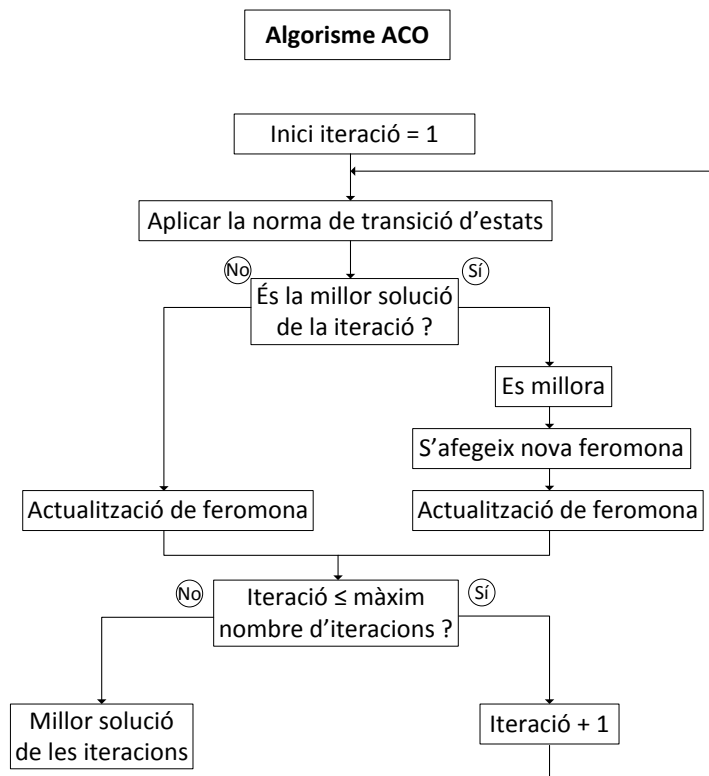


Figura 3.1. Procediment esquemàtic de resolució d'un algorisme ACO (Max – Mix), basat en (34).

Al llarg de la història s'han proposat diversos algorismes que segueixen la metaheurística ACO. Entre els algorismes ACO més utilitzats per a problemes d'optimització combinatoria destaquen: Ant System i Max – Min Ant System.

Tots els algorismes ACO segueixen procediments iteratius basats en càlculs probabilístics.

3.4.1 Ant System:

El Sistema de Formigues (33), fou el primer algorisme ACO proposat. Inicialment es van presentar tres variants diferents: *ant-density*, *ant-quantity*, *ant-cycle*, que es diferencien bàsicament en la forma com actua el rastre de feromona. En les dues primeres variants, les formigues dipositen feromona mentre construeixen les solucions. Per contra en el *ant-cycle*, l'actualització de la feromona es produeix quan totes les formigues de la colònia han completat el seu recorregut. La quantitat de feromona dipositada per cada formiga és funció de la qualitat de la solució construïda en el recorregut. Aquesta darrera variant (*ant-cycle*) de

les tres proposades és la que va obtenir els millors resultats, per la qual cosa es va adoptar per a posteriors versions.

Actualització de la feromona

En aquest mètode, l'actualització de la feromona es realitza una vegada totes les formigues han acabat el seu recorregut i han construït les seves solucions. Després de cada iteració les formigues que han trobat una solució vàlida dipositen feromona en el recorregut que han seguit, de forma que les formigues de la següent iteració tindran tendència a anar cap als recorreguts que porten cap a una solució vàlida, que seran els recorreguts que contenen major quantitat de feromona.

3.4.2 Max – Min Ant System:

El Sistema de Formigues Max – Min Ant System, abreviat en aquest document com a Max – Min, és una versió millorada de l'algorisme Ant System (*ant-cycle*), del qual parteix com a referència. Fou proposat per Stützle i Hoos (35) que introduïren un nombre de canvis dels quals els més importants són els que s'esmenten a continuació:

- Per aprofitar les millors solucions trobades durant una iteració o durant l'execució de l'algorisme només una formiga pot actualitzar els rastres de feromona. Aquesta pot ser la que va trobar la millor solució en una iteració o bé la formiga que obté la millor solució a totes les iteracions. En general, s'adopta la primera de les opcions, que és la que obté millors resultats.
- Per evitar l'estancament de la recerca dels rastres de feromona es limita el rang dels valors del rastre de feromona dins d'un interval d'un valor mínim a un valor màxim.
- Els rastres de feromona són inicialitzats amb un valor màxim del rastre de feromona (τ_{max}) aconseguint una exploració més alta de solucions en l'inici de l'algorisme. Tanmateix, aquests rastres són reinicialitzats cada vegada que el sistema tendeix a estancar-se, és a dir, trobar una solució adequada i no tendir a no explorar noves solucions.

Al igual que tots els algorismes ACO el seu procediment iteratiu segueix una regla de transició d'estat i la particular d'actualització de feromona

- *Regla de transició d'estat*

Per a construir una solució en el seu recorregut les formigues artificials realitzen un càlcul de probabilitats que està basat en la fórmula següent:

$$p_{ij}^m(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{j=0}^{l_i} [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta} \quad (\text{eq. 1})$$

On:

$p_{ij}^m(t)$ és la probabilitat que la formiga $m^{\text{èssima}}$ seleccioni el volum de descàrrega N_i^j ,

$\tau_{ij}(t)$ és el rastre de la feromona en la iteració que es realitza en el temps t ,

α és la importància del rastre de feromona,

η_{ij} és la funció heurística sobre la qual s'ha desenvolupat el present treball,

i β la importància d'aquesta funció heurística.

Actualització de la feromona

L'algorisme Max – Min emprat en aquest estudi únicament addiciona nova feromona a la formiga que ha construït la millor solució a 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 s'estableix per medi de l'equació:

$$\tau_{ij}(t + 1) = \rho \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}^{\text{best}} \quad (\text{eq. 2})$$

On ρ és la persistència del rastre de feromona de la iteració realitzada en el temps t , i $\Delta \tau_{ij}^{\text{best}}$ correspon a l'adició de nova feromona que pren un valor:

$$\Delta \tau_{ij}^{\text{best}} = Z^* \quad (\text{eq. 3})$$

Essent Z^* la millor solució trobada a la iteració realitzada en el temps t .

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 $\tau_{ij}(t) = \tau_{min}$

Els valors límit τ_{max} i τ_{min} 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:

- 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 o està molt a prop de 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, el rastre de feromona màxim per al problema objecte d'estudi s'obté de l'equació:

$$\tau_{max} = \frac{1}{1-\rho} Z^* \quad (\text{eq. 4})$$

- Per al valor de τ_{min} s'estableix

$$\tau_{min} = \frac{\tau_{max}(1 - \sqrt[n]{\rho_{best}})}{(avg - 1)\sqrt[n]{\rho_{best}}} \quad (\text{eq. 5})$$

essent p_{best} un valor de 0.05 (32), (33), n el nombre de variables considerades, avg el nombre mitjà de possibilitats de descàrrega (en el problema particular de les aigües residuals) (36).

A Max – Min els límits inferior i superior (τ_{min} i τ_{max}) sobre els possibles valors de feromona són imposats per evitar l'estancament de la cerca, tal i com s'ha esmentat anteriorment.

Inicialització i reinicialització de rastres de feromona

Al començament de l'algorisme, els rastres de feromona són inicialitzats amb un valor que es tracta d'una estimació del límit superior del rastre de feromona (τ_{max}) per tal d'incrementar l'exploració de resultats durant les primeres iteracions de l'algorisme. En combinació amb un valor gran per a la persistència, aquest produeix que les diferències relatives entre els rastres

de feromona no siguin molt diferents, de forma que al començament de l'algorisme, aquest sigui molt exploratiu en la cerca de solucions.

Max – Min introdueix un medi d'exploració addicional, pels camins que tenen una baixa probabilitat de ser escollits, a través de la reinicialització dels rastres de feromona. Aquest mecanisme s'activa quan l'algorisme s'apropa a una situació d'estancament (mesurat per estadístiques) o si les formigues no han trobat millors camins en un cert nombre d'iteracions.

4 METODOLOGIA

Aquest estudi s'ha desenvolupat seguint les següents etapes:

- Definir un cas d'estudi d'abocaments industrials.
- Definir les formulacions matemàtiques, anomenades heurístics que estableixen els diferents criteris de tendència per a la prioritització de les descàrregues d'aigües residuals industrials.
- Fer les simulacions dels diferents heurístics proposats sobre el cas d'estudi.
- Analitzar i discutir els resultats de costos i descàrregues d'aigua residual obtinguts en les simulacions.

El procediment detallat es mostra esquematitzat a la Figura 4.1.

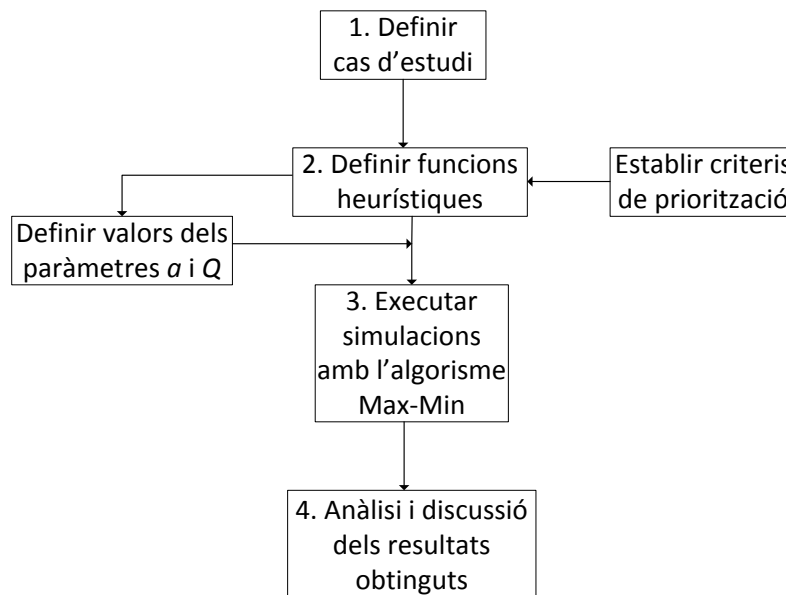


Figura 4.1. Procediment detallat de la metodologia.

Cal fer un especial esment al fet que els resultats de totes les execucions de l'etapa 3 han estat comprovats per medi de fulls de càlcul Excel.

4.1 Cas d'estudi

El cas d'estudi es va compondre de vint-i-dues activitats industrials, cadascuna de les quals disposa del seu propi tanc de retenció, els quals descarreguen l'aigua residual retinuda com a

influent cap a una única EDAR. L'objectiu és assolir una combinació d'aigües residuals que s'apropi al màxim possible, sense sobrepassar-los als límits admissibles per la depuradora.

D'una forma esquemàtica, a la Figura 4.2, es pot veure una representació del procés que segueix l'aigua residual des de que es genera a la indústria fins que es millora en la depuradora.

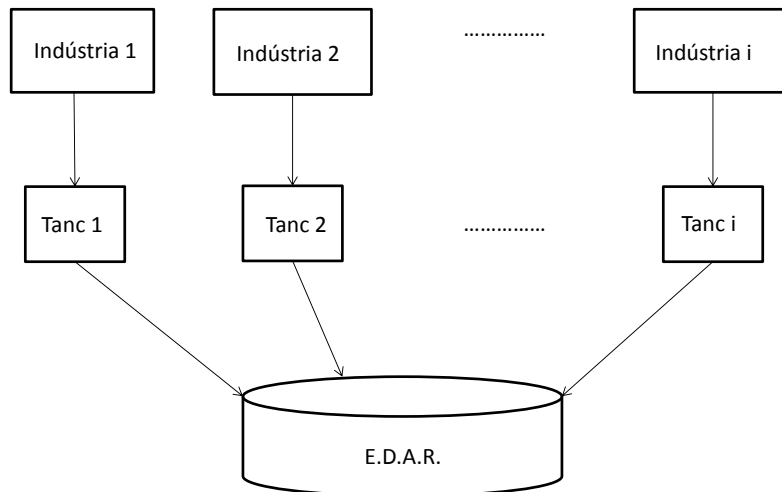


Figura 4.2. Representació esquemàtica del procés que segueix l'aigua residual industrial fins que entra a l'EDAR.

Les aigües industrials generades es caracteritzen pels paràmetres següents:

- Volum.
- Concentració de sòlids en suspensió (MES).
- Concentració de demanda bioquímica d'oxigen (DBO).
- Concentració de demanda química d'oxigen (DQO).
- Concentració de nitrogen total (NT).
- Concentració de fòsfor total (PT).

El cas d'estudi s'ha compost de dos escenaris. L'escenari 1 està constituït per les vint-i-dues d'activitats industrials abans esmentades, cadascuna de les quals genera un volum diferent d'aigua residual, amb característiques de composició diferents. L'escenari 2 està format per les mateixes vint-i-dues activitats industrials, però en aquest cas, totes presenten el mateix volum retengut als tancs de retenció (800 m^3), es mantenen les mateixes composicions de l'escenari 1.

La creació de dos escenaris rau en el fet de poder comparar resultats depenent del volum abocat i de la influència de les càrregues contaminants per a cada indústria.

Pels dos escenaris 1 i 2, els valors mitjans pre-establerts per a cada activitat industrial ($\bar{X}_i^r, r = 1, \dots, 5$), són els mateixos. Els valors numèrics de la Taula 4.1 s'han definit a partir de dades bibliogràfiques (6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 i 22).

Taula 4.1. Valors mitjans pre-establerts. ($\bar{X}_i^r$)

Activitat industrial	MES (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	NT (mg/L)	PT (mg/L)
1 (6)*	422	500	986	78	22
2 (7)*	299	1245	1659	95	20
3 (8)*	150	400	600	78	33
4 (9)*	96	50	67	9	2
5 (10)*	237	570	1487	14	10
6 (11)*	50	25	125	10	5
7 (12)*	725	550	1276	16	2
8 (13)*	130	300	1040	25	2
9 (13)*	200	350	1000	25	5
10 (13)*	75	250	800	60	14
11 (14)*	30	580	1060	70	6
12 (14)*	130	360	990	89	1
13 (15)*	70	20	100	9	2
14 (16)*	10	96	184	2	2
15 (17)*	90	40	200	90	10
16 (18)*	100	66	99	10	2
17 (19)*	39	754	1604	120	3
18 (16)*	100	70	133	7	1
19 (20)*	100	30	250	50	4
20 (21)*	65	24	156	19	1
21 (21)*	224	373	1267	60	11
22 (22)*	110	191	410	21	4

(*) Les dades entre parèntesis indiquen referències bibliogràfiques.

L'escenari 1 i l'escenari 2 es diferencien, tal i com s'ha esmentat anteriorment en la quantitat d'aigua residual retinguda per a cada activitat industrial L_i . A la Taula 4.3 es mostren els volums retinguts els quals corresponen als volum màxims d'abocament possible de cada activitat industrial.

Taula 4.2. Valors de concentració (C_i^r) considerats per a les execucions.

Activitat industrial	MES (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	NT (mg/L)	PT (mg/L)
1	600	500	1450	90	45
2	120	650	1300	28	11
3	400	700	950	85	20
4	500	725	1200	60	20
5	150	300	1000	10	1
6	200	600	1115	65	25
7	500	300	800	5	1
8	300	800	1300	50	10
9	550	700	1550	70	15
10	250	600	1350	90	10
11	100	450	1430	85	10
12	700	700	1450	90	10
13	450	300	650	35	6
14	200	800	950	40	15
15	500	300	1000	70	5
16	400	350	800	6	4
17	300	700	1700	95	2
18	400	500	350	18	5
19	300	150	500	50	25
20	600	450	850	15	15
21	500	700	1400	65	25
22	500	700	900	30	8

Taula 4.3. Valors d'aigua residual als tancs de retenció pels escenaris 1 i 2.

Activitat industrial	Volum d'aigua residual als tancs de retenció en l'escenari 1 (m ³)	Volum d'aigua residual als tancs de retenció en l'escenari 2 (m ³)
1	200	800
2	1500	800
3	700	800
4	600	800
5	2000	800
6	100	800
7	700	800
8	300	800
9	1000	800
10	1300	800
11	700	800
12	900	800
13	1000	800
14	400	800
15	600	800
16	500	800
17	1200	800
18	800	800
19	500	800
20	1400	800
21	900	800
22	500	800

L'EDAR té unes característiques determinades d'admissió d'aigua residual definides per:

- Volum màxim admissible (V).
- Càrrega de sòlids en suspensió màxima admissible (VC^1).

- Càrrega de demanda bioquímica d'oxigen màxima admissible (VC^2).
- Càrrega de demanda química d'oxigen màxima admissible (VC^3).
- Càrrega de nitrogen total màxima admissible (VC^4).
- Càrrega de fòsfor total màxima admissible (VC^5).

Taula: 4.4. Valors per a l'aigua residual admissible a l'EDAR.

Contaminant	Concentració (mg/L)
MES	700
DBO	650
DQO	700
NT	100
PT	20
Volum (m ³)	11000

4.2 Definició de les funcions heurístiques

Les funcions heurístiques objecte d'aquest treball s'emmarquen en el context del procés de prioritització d'abocaments industrials, el qual resol l'algorisme Max – Min. És per aquest motiu que s'exposa a continuació el procés seguit per a la prioritització de les descàrregues d'aigua residual industrial a l'EDAR.

4.2.1 Procés de prioritització de les descàrregues d'aigua residual

Per tal de prioritzar els abocaments es defineixen (36):

- 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 per a cada contaminant.
- Un coeficient punta $T_i^r = f(C_i^r, \overline{X_i^r})$ que s'assigna a cada activitat industrial i a cada contaminant. Per tal de relacionar els valors pre-establerts localitzats en la bibliografia ($\overline{X_i^r}$) amb els valors utilitzats en l'execució (C_i^r), s'utilitza els valors anomenats coeficients punta. Els valors del quocient $C_i^r/\overline{X_i^r}$ permeten obtenir el valor del

coeficient punta segons els valors mostrats a la Taula 4.5. Un augment en el valor del coeficient implica un augment del grau de sobrecàrrega de contaminants en relació als valors mitjans esperats.

- Un coeficient K_i , el qual s'assigna a cada activitat industrial, per tal de considerar la relació entre el volum de la descàrrega i el volum admissible a l'EDAR. El coeficient es defineix emprant una funció contínua creixent, de forma que el seu valor és:

$$K_i = \frac{N_i^j}{2V} \quad (\text{eq. 6})$$

Es maximitza una funció objectiu de cost Z , que està definida per (37):

$$Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{l_i} y_i^j N_i^j \left(v + \Psi K_i \sum_{r=1}^5 C_i^r P^r T_i^r \right) \quad (\text{eq. 7})$$

On:

- y_i^j són les variables de decisió binària que prenen un valor igual a 1 si una activitat industrial i descarrega un volum N_i^j , i 0 en qualsevol altre cas,
- v és un coeficient de cost per unitat volumètrica de descàrrega, establert com un valor constant,
- ψ és un coeficient del pes assignat al cost de les càrregues contaminants, amb un valor constant.

El primer terme de l'equació anterior correspon al cost volumètric, que s'avalua de forma idèntica per a totes les aigües residuals, el segon terme que inclou l'equació anterior 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 que s'han escollit per als coeficients que s'utilitzen en la fórmula anterior han estat $v = 0.1314$ i $\psi = 1.5$.

Per altra banda la funció Z està restringida per les condicions següents:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{l_i} y_i^j N_i^j \leq V \quad (\text{restricció de volum}) \quad (\text{eq. 8})$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{l_i} y_i^j N_i^j C_i^r \leq VC^r, r = 1, \dots, 5 \quad (\text{restriccions de càrregues contaminants}) \quad (\text{eq. 9})$$

$$\sum_{j=0}^{l_i} y_i^j = 1, i = 1, \dots, n \quad (\text{restriccions de variables de decisió}) \quad (\text{eq. 10})$$

Només si una solució satisfà totes les restriccions es considera factible, és a dir, una solució vàlida.

La taula per al càlcul dels coeficients punta és la següent:

Taula 4.5. Taula de valors de coeficient punta (T_i^r).

$C_i^r / \overline{X_i^r}$	$T_i^r (*)$
0 – 1.11	1.00
1.12 – 1.25	1.10
1.26 – 1.50	1.20
1.51 – 1.75	1.50
1.76 – 2.00	1.70
2.01 – 3.00	2.00
3.01 – 4.00	2.50
4.01 – 5.00	3.00
> 5.00	mínim { $(C_i^r / \overline{X_i^r})$, 10.00 }

(*) Font: Generalitat de Catalunya DOGC núm. 4015.

Tal i com es pot observar, el coeficient punta adopta un valor en funció de l'interval en què es trobi el valor del quocient $C_i^r / \overline{X_i^r}$. Així doncs per a cada contaminant i per a cada indústria es determina un valor de coeficient punta T_i^r . Des de la Taula 4.6 fins a la Taula 4.10 es mostren els valors que adquireix aquest coeficient.

Taula 4.6. Valor que pren el coeficient punta T_i^1 pels sòlids en suspensió (MES) en ambdós escenaris.

Activitat	MES (C_i^r)	MES ($\overline{X_i^r}$)	$C_i^r / \overline{X_i^r}$	T_i^1
industrial				
1	600	422	1.42	1.20
2	120	299	0.40	1.00
3	400	150	2.67	2.00
4	500	96	5.21	5.21
5	150	237	0.63	1.00
6	200	50	4.00	2.50
7	500	725	0.69	1.00
8	300	130	2.31	2.00
9	550	200	2.75	2.00
10	250	75	3.34	2.50
11	100	30	3.34	2.50
12	700	130	5.39	5.38
13	450	70	6.43	6.43
14	200	10	20.00	10.00
15	500	90	5.56	5.56
16	400	100	4.00	2.50
17	300	39	7.69	7.69
18	400	100	4.00	2.50
19	300	100	3.00	3.00
20	600	65	9.23	9.23
21	500	224	2.23	2.00
22	500	110	4.55	3.00

Taula 4.7. Valor que pren el coeficient punta T_i^2 per la demanda bioquímica d'oxigen (DBO) en ambdós escenaris.

Activitat	DBO (C_i^r)	DBO ($\overline{X_i^r}$)	$C_i^r / \overline{X_i^r}$	T_i^2
industrial				
1	500	500	1.00	1.00
2	650	1245	0.52	1.00
3	700	400	1.75	1.50
4	725	50	14.50	10.00
5	300	570	0.53	1.00
6	600	25	24.00	10.00
7	300	550	0.55	1.00
8	800	300	2.67	2.00
9	700	350	2.00	1.70
10	600	250	2.40	2.00
11	450	580	0.78	1.00
12	700	360	1.95	1.70
13	300	20	15.00	10.00
14	800	96	8.34	8.34
15	300	40	7.50	7.50
16	350	66	5.30	5.30
17	700	754	0.93	1.00
18	500	70	7.14	7.14
19	150	30	5.00	3.00
20	450	24	18.75	10.00
21	700	373	1.88	1.70
22	700	191	3.67	2.50

Taula 4.8. Valor que pren el coeficient punta T_i^3 per la demanda química d'oxigen (DQO) en ambdós escenaris.

Activitat	DQO (C_i^r)	DQO ($\overline{X_i^r}$)	$C_i^r / \overline{X_i^r}$	T_i^3
industrial				
1	1450	986	1.47	1.20
2	1300	1659	0.78	1.00
3	950	600	1.58	1.50
4	1200	67	17.91	10.00
5	1000	1487	0.67	1.00
6	1115	125	8.92	8.92
7	800	1276	0.63	1.00
8	1300	1040	1.25	1.10
9	1550	1000	1.55	1.50
10	1350	800	1.69	1.50
11	1430	1060	1.35	1.20
12	1450	990	1.46	1.20
13	650	100	6.50	6.50
14	950	184	5.16	5.16
15	1000	200	5.00	3.00
16	800	99	8.08	8.08
17	1700	1604	1.06	1.00
18	350	133	2.63	2.00
19	500	250	2.00	1.70
20	850	156	5.45	4.45
21	1400	1267	1.10	1.00
22	900	410	2.20	2.00

Taula 4.9. Valor que pren el coeficient punta T_i^4 pel nitrogen total sòlids (NT) en ambdós escenaris.

Activitat	NT (C_i^r)	NT ($\overline{X_i^r}$)	$C_i^r / \overline{X_i^r}$	T_i^4
industrial				
1	90	78	1.15	1.10
2	28	95	0.29	1.00
3	85	78	1.09	1.00
4	60	9	6.67	6.67
5	10	14	0.71	1.00
6	65	10	6.50	6.50
7	5	16	0.31	1.00
8	50	25	2.00	1.70
9	70	25	2.80	2.00
10	90	60	1.50	1.20
11	85	70	1.21	1.10
12	90	89	1.01	1.00
13	35	9	3.89	2.50
14	40	2	20.00	10.00
15	70	90	0.78	1.00
16	6	10	0.60	1.00
17	95	120	0.79	1.00
18	18	7	2.58	2.00
19	50	50	1.00	1.00
20	15	19	0.79	1.00
21	65	60	1.08	1.00
22	30	21	1.43	1.20

Taula 4.10. Valor que pren el coeficient punta T_i^5 pel fòsfor total (PT) en ambdós escenaris.

Activitat	PT (C_i^r)	PT ($\overline{X_i^r}$)	$C_i^r / \overline{X_i^r}$	T_i^5
industrial				
1	45	22	2.05	2.00
2	11	20	0.55	1.00
3	20	33	0.61	1.00
4	20	2	10.00	10.00
5	1	10	0.10	1.00
6	25	5	5.00	3.00
7	1	2	0.50	1.00
8	10	2	5.00	3.00
9	15	5	3.00	2.00
10	10	14	0.71	1.00
11	10	6	1.67	1.50
12	10	1	10.00	10.00
13	6	2	3.00	2.00
14	15	2	7.50	7.50
15	5	10	0.50	1.00
16	4	2	2.00	1.70
17	2	3	0.67	1.00
18	5	1	5.00	3.00
19	25	4	6.25	6.25
20	15	1	15.00	10.00
21	25	11	2.27	2.00
22	8	4	2.00	1.70

4.2.2 Formulacions per a la funció heurística

Per tal de millorar l'obtenció de resultats de descàrrega d'aigua residual es proposen i s'utilitzen en les simulacions diferents formulacions matemàtiques. Les dues primeres són una funció potencial, mentre que la tercera és una funció logística.

Aquestes funcions heurístiques són:

- Funció heurística 1:

$$\eta_{ij} = (N_i^j)^a \sum_{r=1}^5 C_i^r \quad (\text{eq. 11})$$

- Funció heurística 2:

$$\eta_{ij} = (N_i^j)^a \sum_{r=1}^5 C_i^r w^r \quad (\text{eq. 12})$$

- Funció heurística 3:

$$\eta_{ij} = \frac{QL_{\max}}{1 + bc^{-N_{ij}}} \quad (\text{eq. 13})$$

Totes les funcions heurístiques proposades van encaminades a afavorir la tendència cap a l'abocament de majors volums i càrregues contaminants per tal que descarreguin els tancs de retenció amb major volum i major càrrega contaminant emmagatzemats, acostant-nos el màxim possible als valors admissibles per la depuradora (assenyalats com a restriccions).

Tot seguit es detallen les diferents propostes:

Heurística 1

La funció heurística 1 és:

$$\eta_{ij} = (N_i^j)^a \sum_{r=1}^5 C_i^r \quad (\text{eq. 11})$$

El comportament d'aquesta equació és el que es mostra a la Figura 4.3.

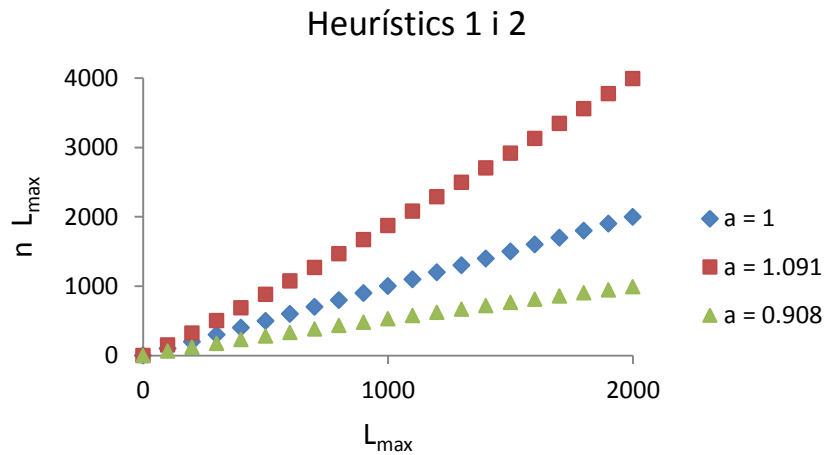


Figura 4.3. Representació esquemàtica de l'evolució de la funció potencial emprada pels heurístics 1 i 2.

Aquesta és una funció de tipus potencial, en la qual es destaca el terme $\sum_{r=1}^5 C_i^r$, que fa referència a les concentracions dels contaminants que descriuen les aigües residuals (MES, DBO, DQO, NT, PT). El terme $(N_i^j)^a$, fa referència als possibles volums d'abocament de cada activitat industrial.

En les simulacions es varia el valor del paràmetre exponencial a per tal d'aconseguir un valor òptim.

Per a calcular els valors de a a testar, s'imposa la condició d'assolir un volum màxim de descàrrega:

L'estructura fonamental d'aquesta equació és:

$$f(x) = y^x \quad (\text{eq. 14})$$

Com que s'utilitzaran nombres enters naturals n , s'estableix que:

$$(L_{max})^a = n L_{max} \quad (\text{eq. 15})$$

Aïllant el valor de a :

$$a = \frac{\ln(L_{max}) + \ln(n)}{\ln(L_{max})} = 1 + \frac{\ln(n)}{\ln(L_{max})} \quad (\text{eq. 16})$$

Així doncs, els valors que s'utilitzaran a les simulacions són els que s'indiquen a la Taula 4.11.

Taula 4.11. Valors del paràmetre $a \geq 1$ en funció del valor que pren n .

Valors de n	Valors de a
1	1.000
2	1.091
3	1.145
4	1.182
5	1.212
6	1.235
7	1.256
8	1.273
9	1.289

També s'ha volgut estudiar l'efecte d'aquesta fórmula matemàtica per a valors de $a < 1$, per la qual cosa:

$$a = 1 - \frac{\ln(n)}{\ln(L_{\max})} \quad (\text{eq. 17})$$

Els valors de a que compleixen el criteri anterior, que s'han testat a la simulació són els que s'indiquen a la Taula 4.12.

Taula 4.12. Valors del paràmetre $a < 1$.

Valors de n	Valors de a
2	0.908
3	0.855
4	0.817
5	0.788
6	0.764
7	0.746
8	0.726
9	0.711

Heurística 2

La funció heurística 2 és:

$$\eta_{ij} = (N_i^j)^a \sum_{r=1}^5 C_i^r w^r \quad (\text{eq. 12})$$

Es tracta també d'una funció de tipus potencial. Aquesta heurística és una variació de la heurística 1, ja que, s'ha incorporat el terme w^r . Aquest terme indica els pesos de les cinc concentracions que descriuen les aigües residuals (MES, DBO, DQO, NT, PT). Cada contaminant té un valor determinat i en funció de quin sigui aquest valor es tendirà a descarregar més volum de la indústria que tingui una concentració més elevada d'aquest contaminant. Els valors del terme w^r per a cada contaminant es mostren a la Taula 4.13.

Taula 4.13. Valor que pren el terme w per a cada contaminant.

Contaminant	Valor que pren el terme w (*)
MES	0.08
DBO	0.11
DQO	0.11
NT	0.10
PT	0.10

(*) Valors extrets del National Sanitation Foundation.

Tal i com s'ha establert per a l'heurística 1, els valors de a s'han obtingut a partir dels valors de n , seguint el mateix procediment de càlcul.

Heurística 3

La funció heurística 3 és:

$$\eta_{ij} = \frac{QL_{\max}}{1 + bc^{-N_{ij}}} \quad (\text{eq. 13})$$

Que correspon a un cas particular de l'expressió logística:

$$f(x) = \frac{A}{1 + bc^{-x}} \quad (\text{eq. 18})$$

Aquest tipus de funció es basa en tres paràmetres: A , b i c . Els paràmetres b i c són la intercepció a l'eix d'ordenades. Com en altres funcions exponencials, la base c és restringida a valors positius. L'únic terme en negatiu d'aquesta funció és l'exponent, que simplement inverteix la típica dependència de l'amplada de la base. El significat del paràmetre A depèn del comportament de la seva funció exponencial.

Per tal d'utilitzar aquesta funció matemàtica com a funció heurística haurem de tenir en compte tres factors:

- En la funció heurística utilitzada A equival $Q L_{max}$. El què aconseguim és tenir una asímptota horitzontal a $y = Q L_{max}$, ja que, $y = A$ és l'asímtota horitzontal.

Per tant:

$$A = Q L_{max}$$

Q són un seguit de nombres enters naturals que s'han anat variant per tal de veure el comportament d'aquesta heurística.

$$g(x) = \frac{Q L_{max}}{1 + bc^{-x}}$$

- Si fem el límit quan $x \rightarrow \infty$ tenim el següent. A més imposam que la funció comenci a una desena part del valor de $Q \cdot L_{max}$. D'aquesta forma ens assegurem que la funció ens aparegui en un terme intermedi dels límits establerts.

$$g(0) = \frac{Q L_{max}}{1 + b}$$

$$\frac{Q L_{max}}{1 + b} = \frac{1}{10} Q L_{max}$$

$$1 + b = 10 \rightarrow \mathbf{b = 9}$$

Per tant, el valor de b a la funció serà de 9.

- Es troba el punt d'inflexió substituint el valor de $b = 9$ a l'equació $g(x)$:

$$g(x) = \frac{QL_{max}}{1 + 9b^{-x}} = QL_{max}(1 + 9b^{-x})^{-1}$$

Fem la derivada primera de l'equació anterior:

$$\begin{aligned} g'(x) &= QL_{max}(-1)(1 + 9c^{-x})^{-2}(-9c^{-x}\ln c)^{-1} = \\ &= 9QL_{max}(\ln c)(1 + 9c^{-x})^{-2}c^{-x} \end{aligned}$$

Fem la derivada segona de l'equació anterior:

$$\begin{aligned} g''(x) &= 9QL_{max}\ln c[-2(1 + 9c^{-x})^{-3}(-9c^{-x}\ln c)c^{-x} - c^{-x}\ln c(1 + 9c^{-x})^{-2}] = \\ &= 9QL_{max}(\ln c)^2c^{-x}(1 + 9c^{-x})^{-3}[18c^{-x} - (1 + 9c^{-x})] = \\ &= 9QL_{max}(\ln c)^2c^{-x}(1 + 9c^{-x})^{-3}[9c^{-x} - 1] = 0 \\ 9c^{-x} - 1 &= 0 \rightarrow c^{-x} = \frac{1}{9} \rightarrow -x\ln c = -\ln 9 \rightarrow \\ x &= \frac{\ln 9}{\ln c} \end{aligned}$$

S'imposa la condició punt d'inflexió trobat estigui en un valor corresponent a una quarta part de L_{max} :

$$\frac{\ln 9}{\ln c} = \frac{1}{4}L_{max}$$

Per tant, si s'aïlla el valor de c :

$$\ln(c) = \frac{4\ln 9}{L_{max}}$$

$$c = e^{\frac{4\ln 9}{L_{max}}}$$

Per tant l'heurístic 3 pren la forma:

$$\eta_{ij} = \frac{QL_{max}}{1 + 9e^{\left(\frac{4\ln 9}{L_{max}}\right)^{-N_{ij}}}} \quad (\text{eq. 19})$$

A les simulacions es consideren els valors de Q següents: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 i 10; i L_{max} amb un valor de 2000 m^3 que correspon al volum màxim retengut a les activitats industrials.

El comportament d'aquesta equació és el que es mostra a la Figura 4.4.

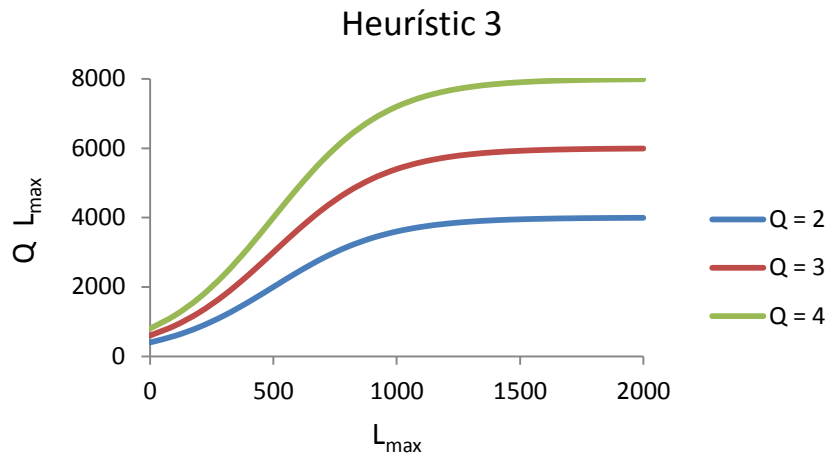


Figura 4.4. Representació esquemàtica de l'evolució de la funció logística emprada per l'heurístic 3.

4.2.3 Execució de les simulacions

Les funcions heurístiques proposades modifiquen el terme η_{ij} de la regla de transició d'estat de l'algorisme Max – Min, de forma que amb cada heurístic la funció de probabilitat canviaria d'expressió i les execucions es realitzaran amb les següents fórmules:

- Utilitzant l'heurístic 1

$$p_{ij}^m(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \left[(N_i^j)^a \sum_{r=1}^5 C_i^r \right]^\beta}{\sum_{l=0}^{l_i} [\tau_{ij}(t)]^\alpha \left[(N_i^j)^a \sum_{r=1}^5 C_i^r \right]^\beta} \quad (\text{eq. 20})$$

- Utilitzant l'heurístic 2

$$p_{ij}^m(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \left[(N_i^j)^a \sum_{r=1}^5 C_i^r w^r \right]^\beta}{\sum_{l=0}^{l_i} [\tau_{ij}(t)]^\alpha \left[(N_i^j)^a \sum_{r=1}^5 C_i^r w^r \right]^\beta} \quad (\text{eq. 21})$$

- Utilitzant l'heurístic 3:

$$p_{ij}^m(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \left[\frac{QL_{\max}}{1 + 9e^{\left(\frac{4 \ln 9}{L_{\max}} \right)^{-N_{ij}}}} \right]^\beta}{\sum_{l=0}^{l_i} [\tau_{ij}(t)]^\alpha \left[\frac{QL_{\max}}{1 + 9e^{\left(\frac{4 \ln 9}{L_{\max}} \right)^{-N_{ij}}}} \right]^\beta} \quad (\text{eq. 22})$$

Les execucions algorísmiques s'han realitzat utilitzant 100 formigues per iteració i 500 iteracions per repetició. Els resultats obtinguts s'han amitjanat sobre 10 repeticions. Totes les repeticions han començat amb una quantitat de feromona $\tau_{max} = 200000$ (eq. 4) a totes les arestes que connecten cada activitat industrial amb les seves possibles descàrregues. D'aquesta forma s'aconsegueix que a l'inici de cada repetició tots els camins que poden seguir les formigues tinguin la mateixa probabilitat de ser escollits.

Els valors de funcionament de l'algorisme: importància de la feromona (α), i importància de la funció heurística (β) van ser per a totes les simulacions 1 i 2, respectivament (36), un valor de la persistència de feromona (ρ) de 0.98 i un valor de p_{best} de 0.05 (33), (35).

Totes les simulacions del cas d'estudi s'han realitzat en un ordinador, Packard Bell Easy Note TM, intel CORE i5.

5 RESULTATS I DISCUSSIONS

En aquest apartat es mostraran els resultats de les funcions emprades i la seva discussió.

5.1 Funció heurística 1

Tal i com s'ha definit al capítol 4 la funció heurística 1 és:

$$\eta_{ij} = (N_i^j)^a \sum_{r=1}^5 C_i^r \quad (\text{eq. 11})$$

Els resultat obtinguts en les simulacions amb aquesta funció són els que s'exposen a continuació. On primer observarem l'evolució dels costos assolits i a continuació la distribució de les descàrregues d'aigua residual obtingudes.

5.1.1 Evolució de costos

5.1.1.1 Escenari 1

L'heurístic 1 (eq. 11) es va testar per a valors del paràmetre a entre [0.711, 1.289] tal i com s'ha definit anteriorment al capítol 4. Per a l'escenari 1 s'han obtingut els valors de $\bar{Z}$ que s'indiquen a la Taula 5.1.

Taula 5.1. Taula de resultats de $\bar{Z}$ en funció del paràmetre a per a l'escenari 1.

Valor del paràmetre a	$\bar{Z}$ (€)
0.711	4332.17
0.726	4332.04
0.746	4328.42
0.764	4336.32
0.788	4331.47
0.817	4333.55
0.855	4328.96
0.908	4326.15
1.000	4642.52
1.091	4234.09
1.145	3602.00
1.182	3208.83
1.212	3147.35
1.235	2718.24
1.256	2699.21
1.273	2628.86
1.289	2629.42

S'observa que el millor resultat de cost és $\bar{Z} = 4642.52$, que correspon un valor del paràmetre a igual a 1. La Figura 5.1 mostra la representació gràfica dels resultats de $\bar{Z}$.

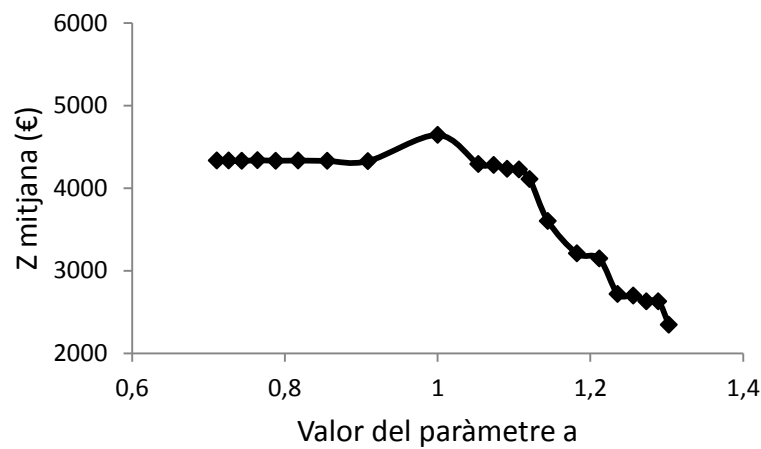


Figura 5.1. Evolució del resultat $\bar{Z}$ en funció del paràmetre a per a l'escenari 1 utilitzant l'heurístic 1.

Tal i com s'observa per a valors més petits del paràmetre a es manté una tendència de $\bar{Z}$ envers un valor constant, fins que a és igual a 1. En aquest punt $\bar{Z}$ presenta un valor màxim. A partir d'aquest valor, quan s'incrementa a , s'observa un decreixement del valor de $\bar{Z}$.

5.1.1.2 Escenari 2

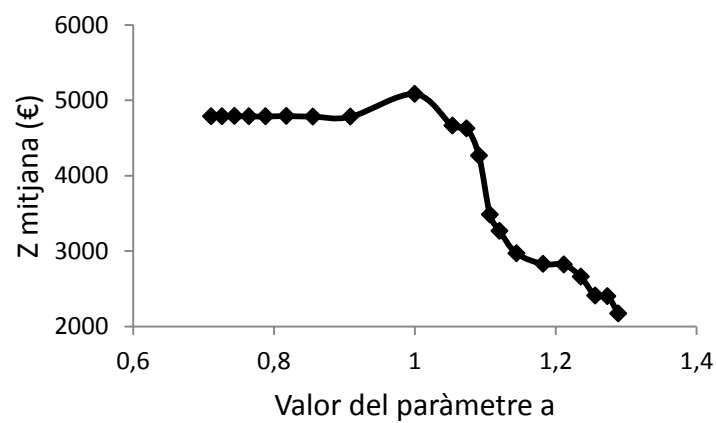
Per a l'escenari 2, el qual correspon a activitats industrials amb iguals volums a tots els tancs de retenció, els resultats de $\bar{Z}$ en funció del paràmetre a van ser els que s'indiquen a la Taula 5.2.

S'observa que el millor resultat de cost és $\bar{Z} = 5082.53$, que al igual que passava a l'escenari 1, correspon a un valor del paràmetre a igual a 1.

Taula 5.2. Taula de resultats de $\bar{Z}$ en funció del paràmetre α per a l'escenari 2.

Valor del paràmetre α	$\bar{Z}$ (€)
0.711	4785.90
0.726	4784.16
0.746	4789.02
0.764	4785.69
0.788	4784.92
0.817	4790.13
0.855	4782.70
0.908	4780.69
1.000	5082.53
1.091	4264.79
1.145	2970.36
1.182	2827.96
1.212	2822.75
1.235	2659.27
1.256	2408.64
1.273	2401.20
1.289	2171.47

La Figura 5.2 mostra la representació gràfica dels resultats obtinguts per a $\bar{Z}$ amb els diferents valors del paràmetre α .

Figura 5.2. Evolució de $\bar{Z}$ en funció del paràmetre α per a l'escenari 2 utilitzant l'heurístic 1.

A la figura s'observa que per a valors del paràmetre α menors que 1, es manté una tendència

de $\bar{Z}$ constant fins que α pren un valor igual a 1. Aleshores el cost $\bar{Z}$ assoleix un màxim. A partir d'aquest valor, quan s'incrementa el valor del paràmetre α , es manté una tendència decreixent, més pronunciada que a l'escenari 1. S'observa doncs una major tendència a obtenir solucions pitjors en aquest escenari que a l'escenari 1.

5.1.2 Evolució de la descàrrega d'aigua residual

5.1.2.1 Escenari 1

Els resultats de descàrrega obtinguts amb l'heurístic 1 (eq. 11) han estat els següents

Taula 5.3. Resultats obtinguts en l'escenari 1 utilitzant l'heurístic 1.

Valor del paràmetre α	Volum (m^3)	MES (kg)	DBO (kg)	DQO (kg)	NT (kg)	PT (kg)
0.711	8610	3920.60	4221.00	7681.70	352.44	99.20
0.726	8690	3866.50	4198.50	7661.50	350.90	99.97
0.746	8800	3931.20	4267.50	7682.50	349.59	102.33
0.764	8610	3829.60	4213.00	7682.50	355.24	99.77
0.788	8580	3708.70	4135.00	7676.00	352.98	98.25
0.817	8620	3770.80	4154.00	7670.00	348.27	97.99
0.855	8760	3930.50	4255.50	7683.20	350.55	101.83
0.908	8740	3934.80	4256.00	7693.70	353.27	101.83
1.000	9020	3530.00	3920.00	7640.40	283.25	84.44
1.091	8550	3739.20	4185.00	7643.00	345.23	100.48
1.145	7940	3366.50	3961.25	7644.70	330.82	91.94
1.182	7720	3326.00	3935.00	7634.90	328.41	90.66
1.212	7730	3180.20	3952.25	7651.10	343.01	91.16
1.235	7480	3062.20	3813.25	7633.00	338.54	86.58
1.256	7600	3089.10	3930.00	7632.80	349.54	87.37
1.273	7560	2968.90	3877.25	7641.00	334.75	83.93
1.289	7520	3027.60	3956.50	7637.90	354.75	87.69

S'observa que quan es descarrega més volum del tanc de retenció és quan el valor del paràmetre α pren el valor de 1.

En les representacions gràfiques s'observa que les descàrregues segueixen la mateixa tendència observada per als costos (Figura 5.1). Quan α és igual a 1, el volum d'abocament presenta el màxim d'aquest escenari amb un valor de $9020 m^3$. Aquest volum és un 82% del total del volum admissible a l'EDAR, i conté un 99.2% de la càrrega de DQO admissible.

La representació gràfica de la distribució de la seqüència de descàrregues associada a cada solució de cost amb cadascun dels valors del paràmetre a testats es mostren a continuació. Per tal de simplificar la discussió de resultats, es presenta la discussió del primer dels paràmetres testats i del que obté una millor solució.

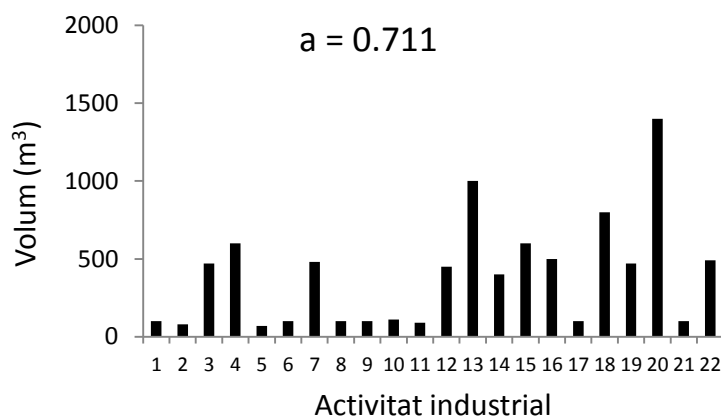


Figura 5.3. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 0.711$.

Per aquest valor del paràmetre a s'observa que les activitats industrials 13, 18 i 20 són les que presenten una major descàrrega, amb un 100% de descàrrega del volum que tenien inicialment retintut, i descarreguen un 37.16% del volum total descarregat amb aquest valor del paràmetre en aquest escenari.

A continuació es mostren les distribucions assolides pels paràmetres [0.726, 1.289]. Es fa especial èmfasi als resultats obtinguts per a un valor de $a = 1$.

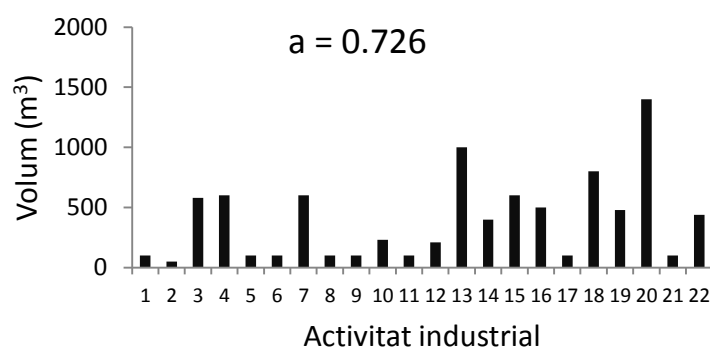


Figura 5.4. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 0.788$.

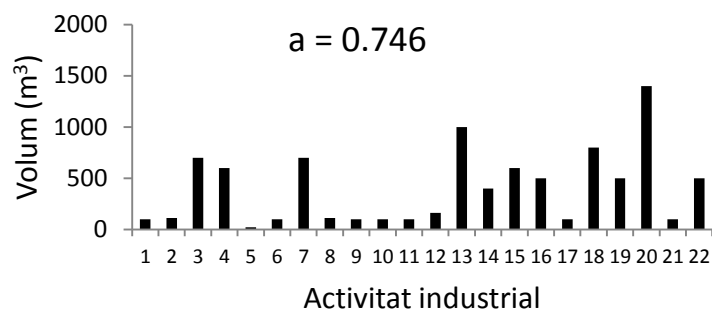


Figura 5.5. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 0.746$.

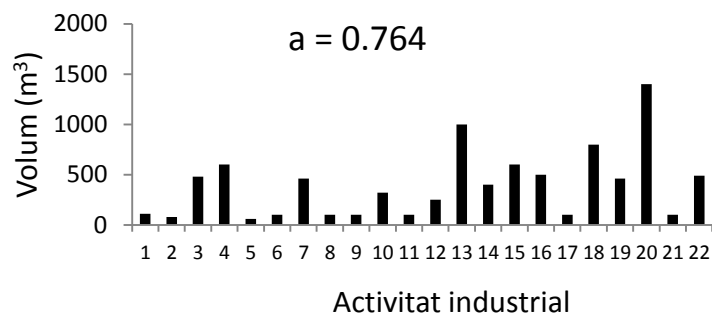


Figura 5.6. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 0.764$.

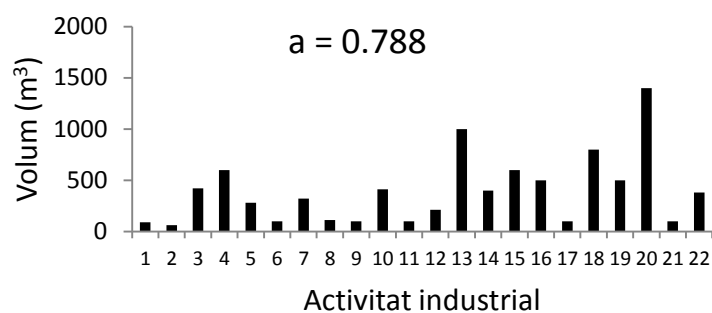


Figura 5.7. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 0.788$.

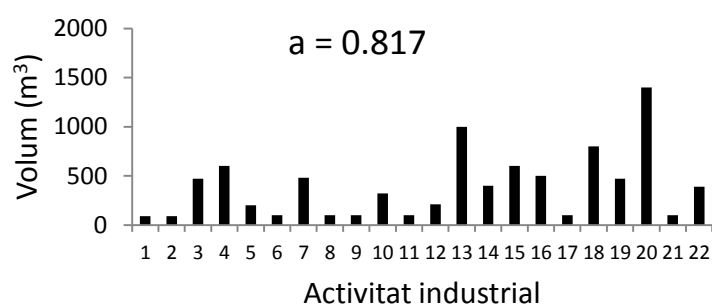


Figura 5.8. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 0.817$.

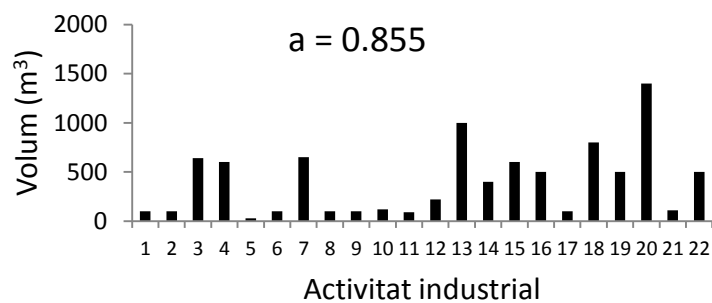


Figura 5.9. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 0.855$.

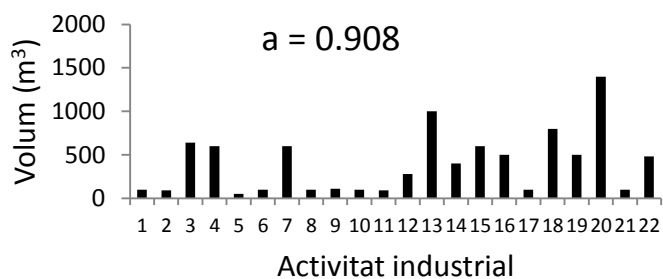


Figura 5.10. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 0.908$.

Per a un valor del paràmetre $a = 1$ s'obté la gràfica 5.11.

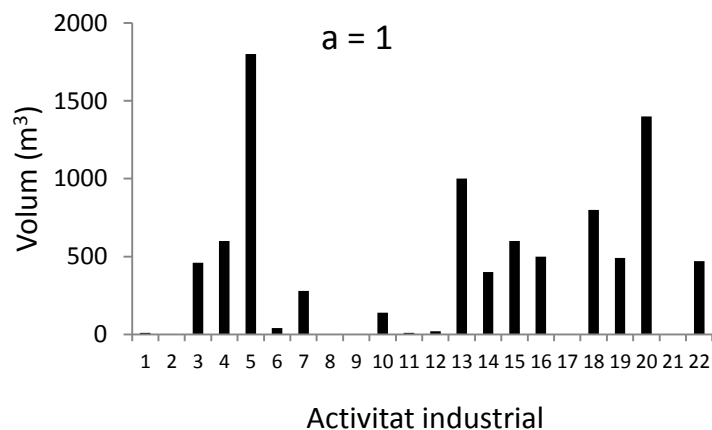


Figura 5.11. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 1$.

Per aquest valor del paràmetre s'observa que les activitats industrials 5, 13, 18 i 20 són les que presenten una major descàrrega, amb un 96.15% de descàrrega del volum que tenien

inicialment retingut, amb una descàrrega del 45.45% del volum admissible a l'EDAR i un 55.43% del volum total descarregat per a aquest valor del paràmetre, en aquest escenari.

En aquesta gràfica també s'observa que les activitats 2, 8, 9, 17 i 21 no presenten abocament la qual cosa és deguda a les restriccions. També, cal fer un especial esment a les activitats 1, 6, 11 i 12, amb un volum d'abocament molt petit (0.89%), la qual cosa fa que el seu valor no sigui clarament perceptible al gràfic.

A part de la concentració de DQO que conté l'aigua residual, s'observen també com a paràmetres d'interès per a definir el comportament els contaminants: MES i DBO. En quant als contaminants NT (Nitrogen Total) i PT (Fòsfor Total), es mostren amb una menor importància degut als menors valors de les seves concentracions. La descàrrega d'aigua residual obtinguda conté un 45.84% de la càrrega de MES admissible a l'EDAR i un 54.83% de la càrrega de DBO admissible.

La diferència entre el volum retingut i el volum que s'aboca des de cada tanc de retenció per aquest valor de $\alpha = 1$ es mostra a la Figura 5.12.

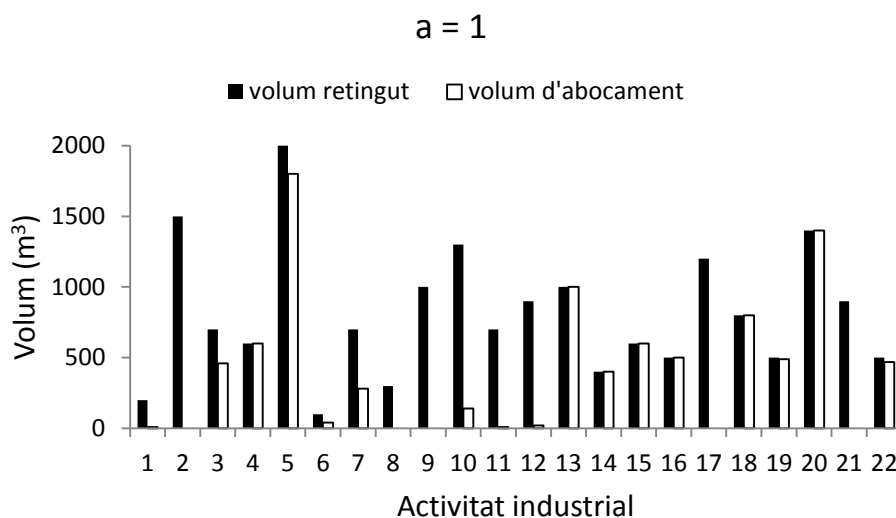


Figura 5.12. Relació entre el volum retingut i el volum abocat per a l'escenari 1 utilitzant l'heurístic 1.

S'observa que el percentatge d'abocament és relativament elevat. Per a valors del paràmetre $\alpha > 1$, els resultats obtinguts es mostren a partir de la Figura 5.13 fins a la Figura 5.20.

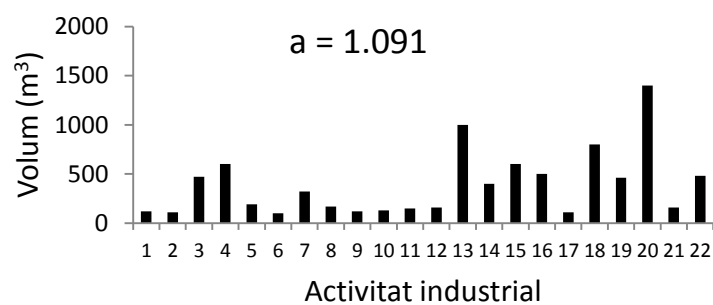


Figura 5.13. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 1.091$.

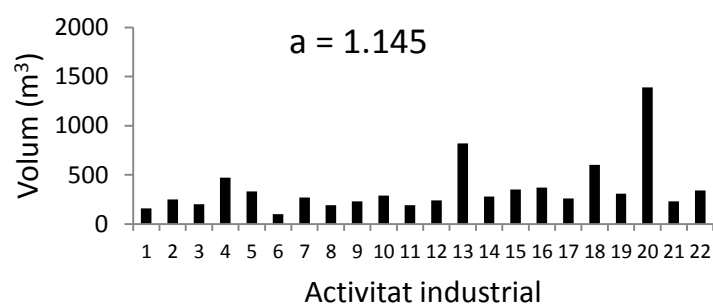


Figura 5.14. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 1.145$.

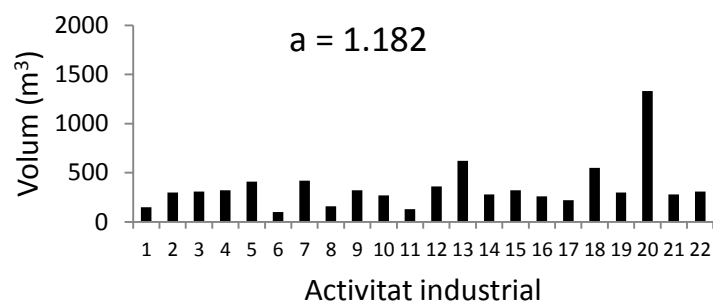


Figura 5.15. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 1.182$.

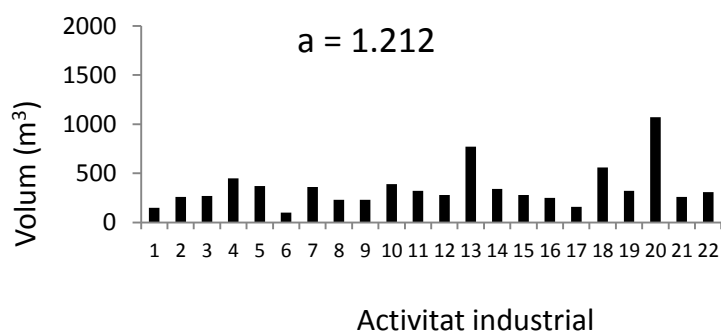


Figura 5.16. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 1.212$.

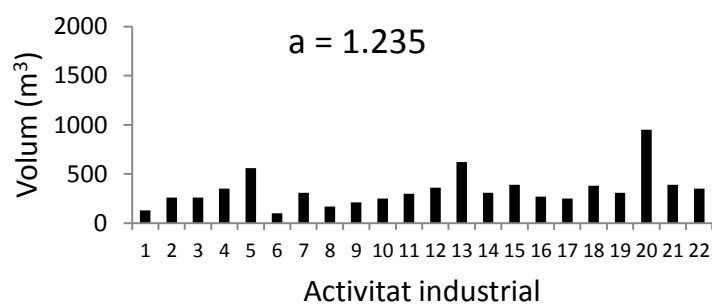


Figura 5.17. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 1.235$.

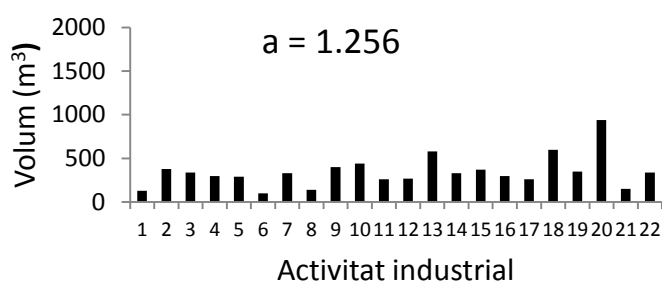


Figura 5.18. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 1.256$.

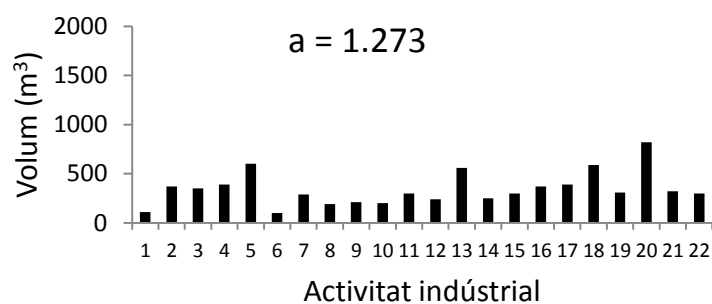


Figura 5.19. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 1.273$.

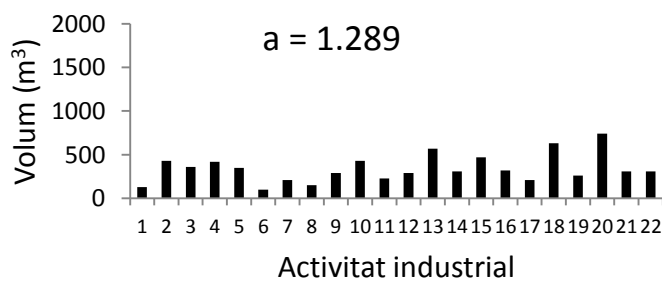


Figura 5.20. Distribució del volum de descàrrega obtingut per a cada activitat industrial amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 1.289$.

5.1.2.2 Escenari 2

Tal i com s'ha indicat anteriorment (Capítol 4) l'escenari 2 correspon a volums iguals d'aigua residual retinguda als dipòsits per a totes les activitats industrials.

Els resultats obtinguts amb l'heurístic 1 (eq. 11) han estat els que es mostren a la Taula 5.4.

Taula 5.4 . Resultats obtinguts en l'escenari 2 utilitzant l'heurístic 1.

Valor del paràmetre α	Volum (m ³)	MES (kg)	DBO (kg)	DQO (kg)	NT (kg)	PT (kg)
0.711	8600	3390.10	4204.00	7693.00	377.14	115.01
0.726	8590	3376.50	4220.50	7693.00	379.55	115.78
0.746	8600	3381.30	4214.50	7693.00	379.82	115.81
0.764	8590	3373.50	4224.50	7694.00	379.25	115.83
0.788	8590	3374.50	4225.00	7695.50	380.10	115.68
0.817	8600	3382.60	4215.00	7697.00	381.04	115.92
0.855	8590	3384.00	4228.50	7689.50	374.15	114.55
0.908	8590	3401.30	4230.50	7692.00	371.57	113.59
1.000	9060	3684.20	4547.50	7646.50	380.78	118.60
1.091	8180	3212.70	4241.50	7719.80	356.82	109.14
1.145	7540	2859.00	4029.75	7642.50	356.86	96.08
1.182	7520	2883.00	3892.00	7649.05	368.79	93.97
1.212	7530	2933.20	3979.75	7655.40	367.68	95.59
1.235	7420	2863.90	4008.50	7647.85	364.90	99.20
1.256	7420	2932.50	3926.50	7653.00	366.99	94.95
1.273	7420	2861.80	3876.50	7659.40	355.80	89.74
1.289	7260	2890.00	3960.25	7653.25	367.26	89.53

S'observa que quan es descarrega més volum del tanc de retenció és quan el valor del paràmetre α pren el valor de 1, al igual que s'ha observat en l'escenari 1.

En les representacions gràfiques es percep que les descàrregues segueixen la mateixa tendència que els costos (Figura 5.1). Quan α és igual a 1, el volum d'abocament presenta el màxim d'aquest escenari amb un valor de 9060 m³. Aquest volum és un 82.36% del total del volum total admissible a l'EDAR i conté un 99.31% de la càrrega de DQO admissible.

La raó per la qual no s'aboca la totalitat del volum admissible són les restriccions sobre les càrregues contaminants, entre les quals, el contaminant DQO té un rol dominant degut als seus elevats valors de concentració i preu. (37)

La representació gràfica de la distribució de la seqüència de descàrregues associada a cada solució de cost amb cadascun dels valors del paràmetre α testats es mostren a continuació.

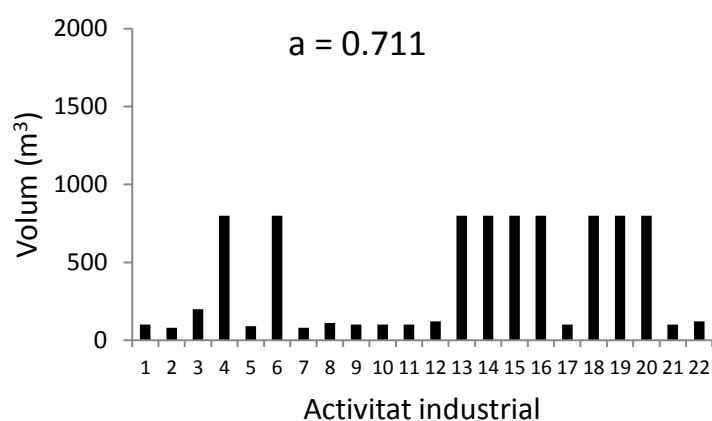


Figura 5.21. Distribució del volum de descàrrega obtingut per a cada activitat industrial amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $\alpha = 0.711$.

Per aquest valor del paràmetre α s'observa que les activitats industrials 4, 6, 13, 14, 15, 16, 18, 19 i 20 són les que presenten una major descàrrega, amb un 100% de descàrrega respecte al volum que tenien inicialment retintut, i descarreguen un 83.72% del volum total descarregat amb aquest valor del paràmetre, en aquest escenari.

A continuació es mostren les distribucions assolides pels paràmetres [0.726, 1.289], fent especial èmfasi als resultats obtinguts per a un valor de $\alpha = 1$.

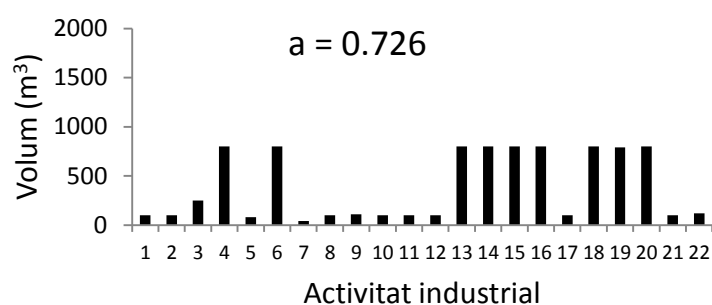


Figura 5.22. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $\alpha = 0.726$.

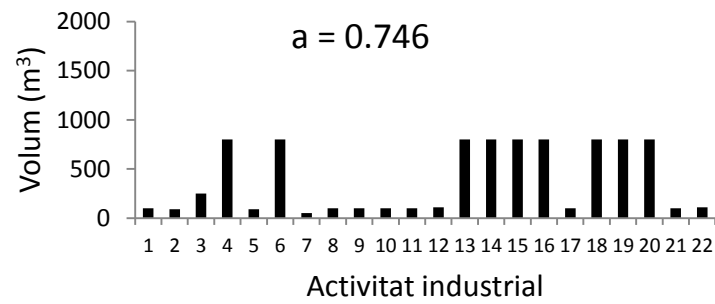


Figura 5.23. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 0.746$.

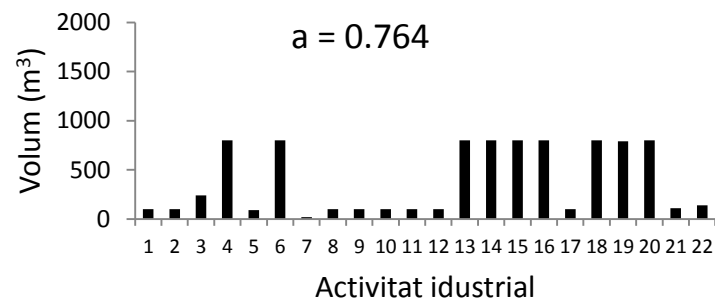


Figura 5.24. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 0.764$.

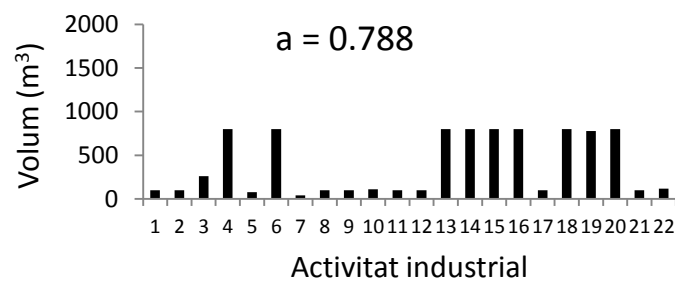


Figura 5.25. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 0.788$.

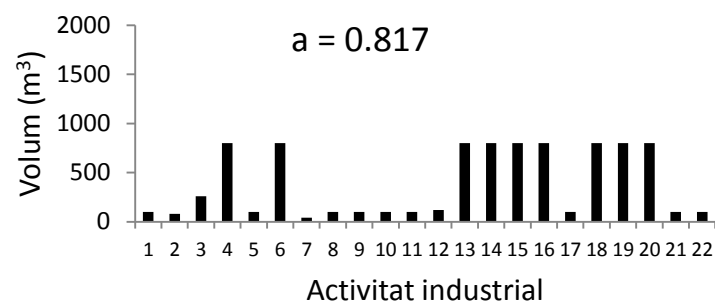


Figura 5.26. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 0.817$.

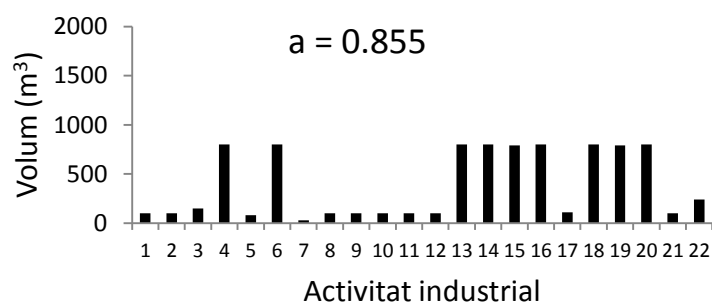


Figura 5.27. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 0.855$.

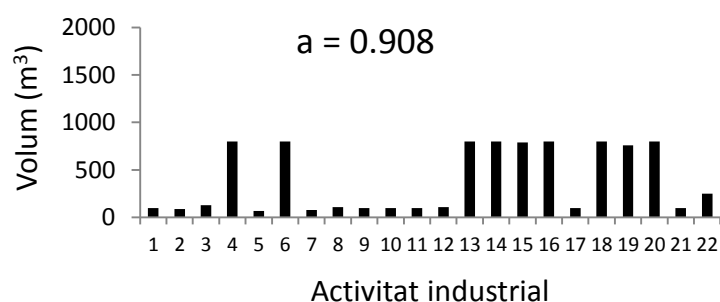


Figura 5.28. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 0.908$.

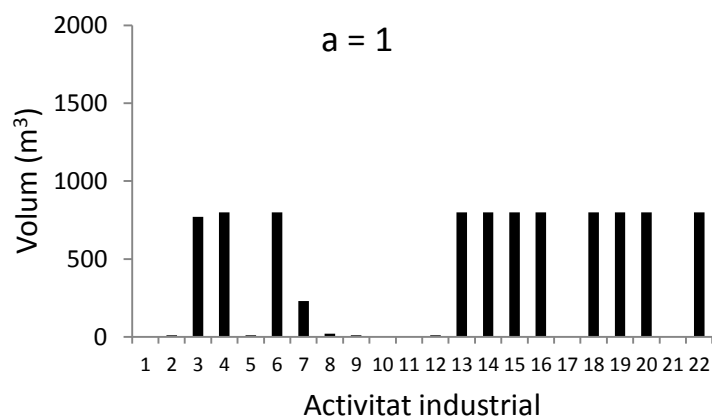


Figura 5.29. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 1$.

Per aquest valor del paràmetre a s'observa que les activitats industrials 3, 4, 6, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 20 i 22 són les que presenten una major descàrrega, amb un 99.67% de descàrrega del volum que tenien inicialment retingut, amb una descàrrega del 79.72% del volum admissible a l'EDAR i un 96.79% del volum total descarregat amb aquest valor del paràmetre, en aquest escenari.

En aquesta gràfica també s'observa que les activitats 1, 10, 11, 17 i 21 no presenten abocament, i les activitats 2, 5, 8, 9 i 12 presenten un abocament molt petit, un 0.55% respecte a la totalitat de volum abocat per aquest valor del paràmetre, a causa de les restriccions imposades.

A part de la concentració de DQO que conté l'aigua residual, es vol comentar especialment els altres dos paràmetres corresponents a les concentracions de MES i DBO. Per una banda, l'aigua residual de la descàrrega conté un 47.85% de la càrrega de MES admissible a l'EDAR i un 63.60% de la càrrega de DBO admissible.

A continuació es representa el perfil de les descàrregues volumètriques obtingudes, en comparació amb el volum inicial retingut a cada activitat industrial.

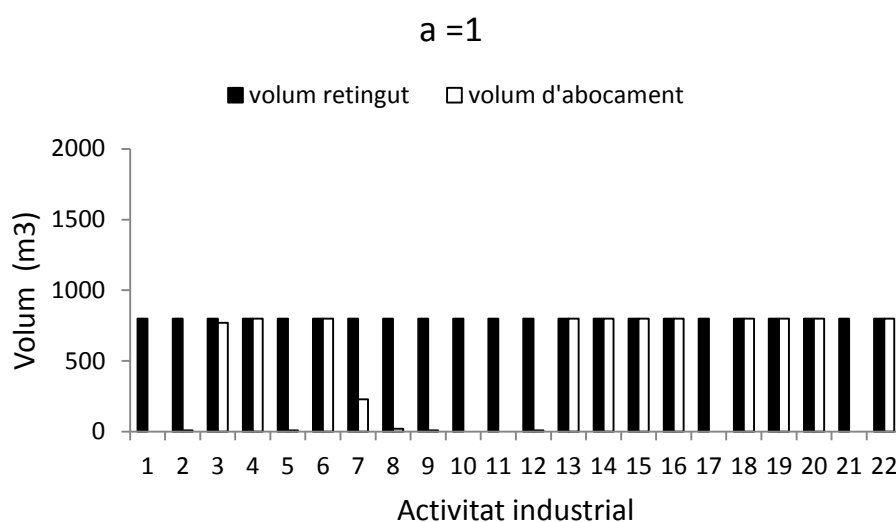


Figura 5.30. Relació entre el volum retingut i el volum abocat per a l'escenari 2 utilitzant l'heurístic 1.

A continuació es mostren les representacions gràfiques dels resultats obtinguts per a valors del paràmetre $a > 1$, des de la Figura 5.31 fins a la 5.38.

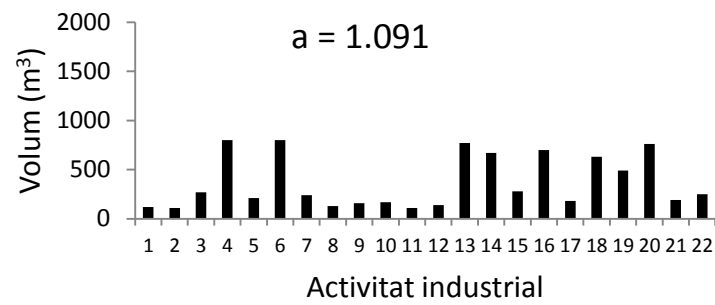


Figura 5.31. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 1.091$.

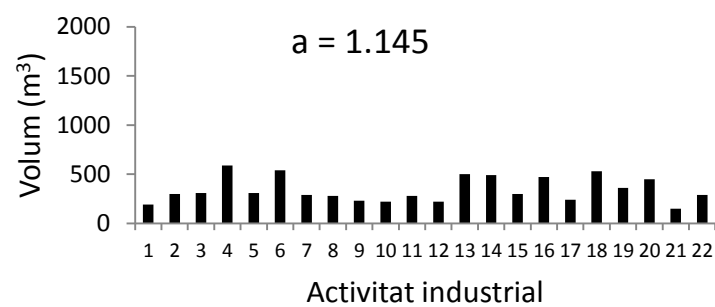


Figura 5.32. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 1.145$.

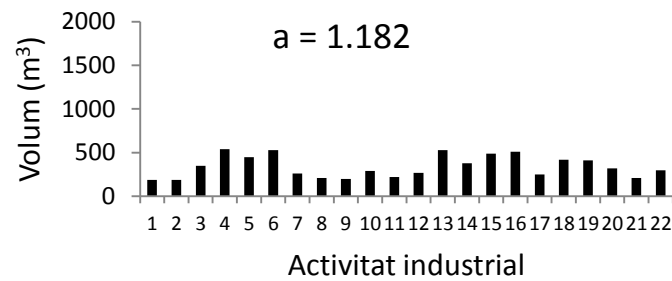


Figura 5.33. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 1.182$.

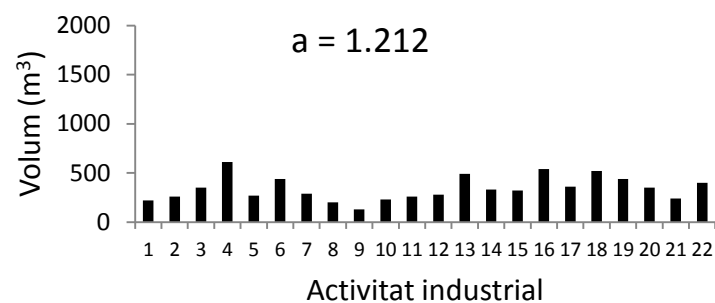


Figura 5.34. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 1.212$.

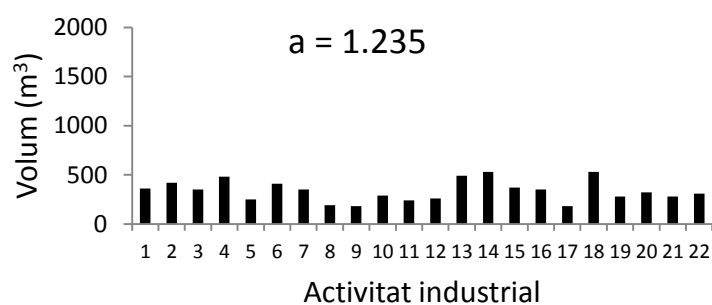


Figura 5.35. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 1.235$.

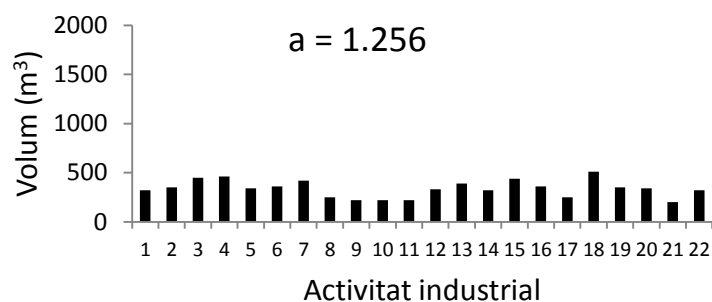


Figura 5.36. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 1.256$.

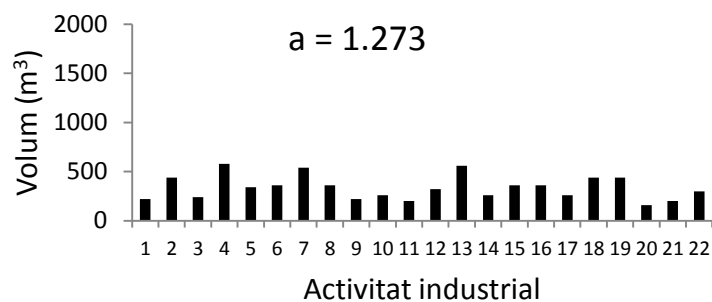


Figura 5.17. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 1.273$.

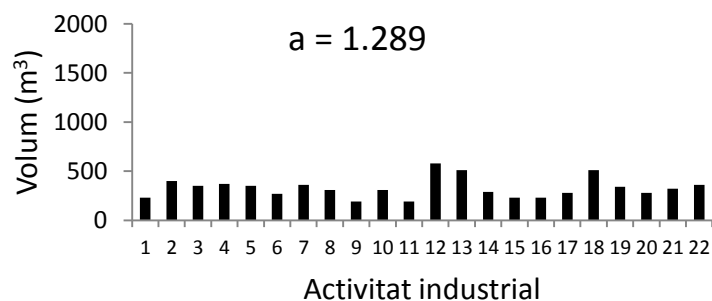


Figura 5.38. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 1 i un valor del paràmetre $a = 1.289$.

S'observa que els resultats per a ambdós escenaris empitjoren notablement a mesura que augmentem el valor del paràmetre α .

5.2 Funció heurística 2

Tal i com s'ha definit al capítol 4 la funció heurística 2 és:

$$\eta_{ij} = \left(N_i^j\right)^\alpha \sum_{r=1}^5 C_i^r w^r \quad (\text{eq. 12})$$

Els resultats obtinguts en les simulacions amb aquesta funció són els que s'exposen a continuació. On primer es pot observar l'evolució dels costos assolits i a continuació la distribució de les descàrregues d'aigua residual obtingudes.

5.2.1 Evolució de costos

L'heurístic 2 (eq. 12) es va testar per a valors del paràmetre α entre [0.711, 1.289] tal i com s'ha definit anteriorment al capítol 4.

Obtenint-se els valors de $\bar{Z}$ que s'indiquen a la Taula 5.5.

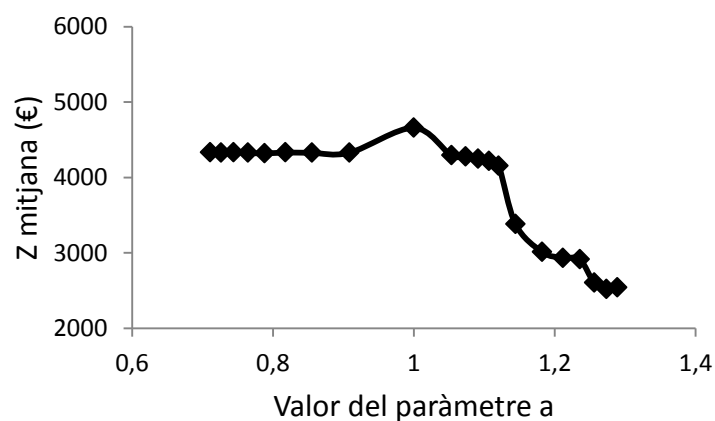
5.2.1.1 Escenari 1

L'escenari 1 correspon a activitats industrials que retenen diferents volums d'aigua residual als tancs de retenció.

Taula 5.5. Taula de resultats de $\bar{Z}$ en funció del paràmetre a per a l'escenari 1.

Valor del paràmetre a	$\bar{Z}$ (€)
0.711	4330.12
0.726	4329.01
0.746	4331.24
0.764	4326.20
0.788	4318.59
0.817	4330.66
0.855	4325.85
0.908	4328.64
1.000	4658.13
1.091	4245.25
1.145	3379.59
1.182	3012.05
1.212	2933.12
1.235	2914.26
1.256	2605.13
1.273	2520.18
1.289	2542.58

S'observa que el millor resultat de cost és $\bar{Z} = 4658.13$, que correspon un valor del paràmetre a igual a 1. La Figura 5.39 mostra la representació gràfica dels resultats de $\bar{Z}$.

Figura 5.39. Evolució de $\bar{Z}$ en funció del paràmetre a per a l'escenari 1 utilitzant l'heurístic 2.

Tal i com s'observa per a valors més petits del paràmetre a es manté una tendència de $\bar{Z}$ envers un valor constant, fins que a és igual a 1. En aquest punt $\bar{Z}$ presenta un valor màxim. A partir d'aquest valor, quan s'incrementa a , s'observa un decreixement del valor de $\bar{Z}$.

5.2.1.2 Escenari 2

Per a l'escenari 2, el qual correspon a activitats industrials amb iguals volums a tots els tancs de retenció, els resultats de $\bar{Z}$ en funció del paràmetre α van ser els que s'indiquen a la Taula 5.6.

Taula 5.6. Taula de resultats de $\bar{Z}$ en funció del paràmetre α per a l'escenari 2.

Valor del paràmetre α	$\bar{Z}$ (€)
0.711	4784.91
0.726	4784.33
0.746	4783.65
0.764	4785.87
0.788	4787.52
0.817	4780.53
0.855	4788.46
0.908	4787.87
1.000	5086.19
1.091	4067.18
1.145	3068.92
1.182	2842.80
1.212	2668.76
1.235	2424.59
1.256	2504.06
1.273	2318.26
1.289	2454.13

S'observa que el millor resultat de cost és $\bar{Z} = 5086.19$, al igual que passava en l'escenari 1, correspon a un valor del paràmetre α igual a 1.

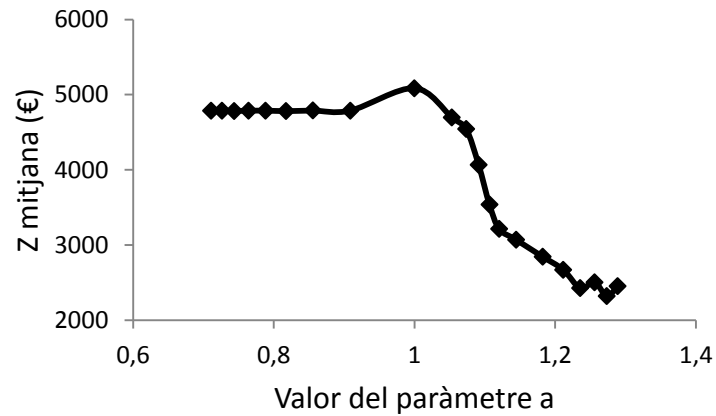


Figura 5.40. Evolució de $\bar{Z}$ en funció del paràmetre a per a l'escenari 2 utilitzant l'heurístic 2.

A la Figura 5.40 s'observa que per a valors del paràmetre a menors que 1, es manté una tendència de $\bar{Z}$ constant fins que a pren un valor igual a 1. Aleshores el cost $\bar{Z}$ assoleix un màxim. A partir d'aquest valor, quan s'incrementa el valor del paràmetre a , es manté una tendència decreixent, més pronunciada que a l'escenari 1.

5.2.2 Evolució de la descàrrega d'aigua residual

5.2.2.1 Escenari 1

Els resultats obtinguts amb l'heurístic 2 (eq. 12) han estat els que es mostren a la Taula 5.7.

S'observa que quan es descarrega més volum del tanc de retenció és quan el valor del paràmetre a pren el valor de 1.

Taula 5.7. Resultats obtinguts en l'escenari 1 utilitzant l'heurístic 2.

Valor del paràmetre α	Volum (m ³)	MES (kg)	DBO (kg)	DQO (kg)	NT (kg)	PT (kg)
0.711	8750	3893.20	4250.50	7681.30	350.48	101.18
0.726	8640	3711.70	4121.00	7666.00	337.53	97.71
0.746	8610	3856.80	4210.00	7676.50	358.12	100.61
0.764	8620	3887.00	4173.50	7669.00	350.10	99.58
0.788	8700	3866.80	4242.00	7694.50	355.92	101.34
0.817	8520	3704.30	4136.00	7669.50	356.82	97.54
0.855	8750	3905.20	4236.50	7660.70	349.13	101.34
0.908	8800	3909.40	4246.50	7666.00	349.26	101.53
1.000	9090	3546.50	3953.00	7681.70	286.50	85.91
1.091	8560	3718.40	4121.00	7628.70	338.21	97.04
1.145	7730	3254.40	3915.75	7626.00	330.72	91.30
1.182	7580	3128.90	3758.50	7598.10	324.21	84.13
1.212	7640	3122.20	3901.00	7630.50	329.54	89.93
1.235	7670	3173.90	3885.25	7643.70	335.17	88.65
1.256	7630	3096.80	3868.75	7619.30	339.44	87.09
1.273	7470	2976.60	3792.25	7627.70	342.11	82.45
1.289	7530	3020.70	3858.25	7614.20	357.61	84.37

En les representacions gràfiques s'observa que les descàrregues segueixen la mateixa tendència observada per als costos (Figura 5.39). Quan α és igual a 1, el volum d'abocament presenta el màxim d'aquest escenari amb un valor de 9090 m³. Aquest volum és un 82.63% del volum total admissible a l'EDAR, i conté un 99.76% de la càrrega de DQO total admissible a l'EDAR, la qual cosa ens permet afirmar que l'abocament assolit és de gairebé la totalitat de la càrrega de DQO que ens permet la corresponent restricció.

Les representacions gràfiques de la distribució de la seqüència de descàrregues associada a cada solució de cost amb cadascun dels valors del paràmetre α testats es mostren a continuació.

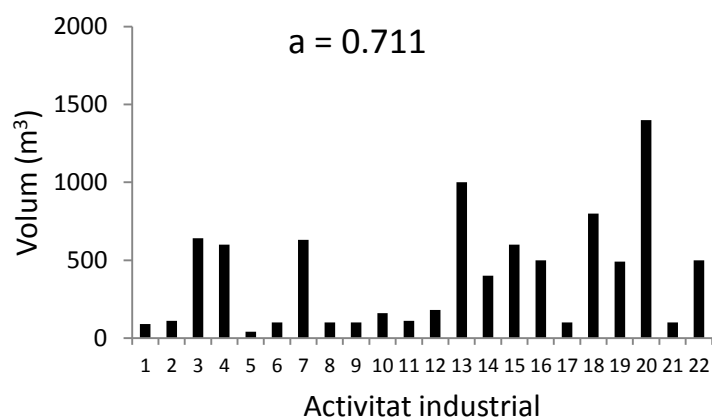


Figura 5.41. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 0.711$.

Per aquest valor del paràmetre a s'observa que les activitats industrials 13, 18 i 20 són les que presenten una major descàrrega, amb un 100% de descàrrega del volum que tenien inicialment retingut, i descarreguen un 36.57% del volum total descarregat amb aquest valor del paràmetre, en aquest escenari.

A continuació es mostren les distribucions de descàrregues d'aigua residual assolides pels paràmetres [0.726, 1.289]. Es fa especial èmfasi als resultats obtinguts per a un valor de $a = 1$.

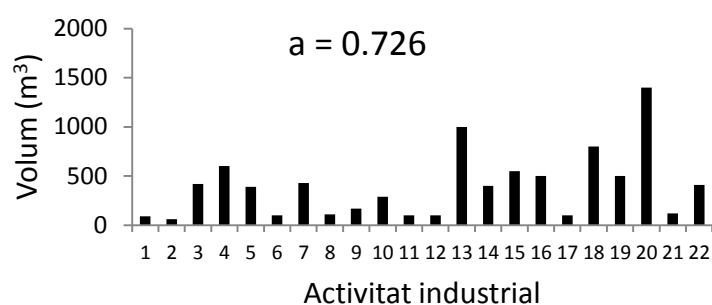


Figura 5.43. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 0.726$.

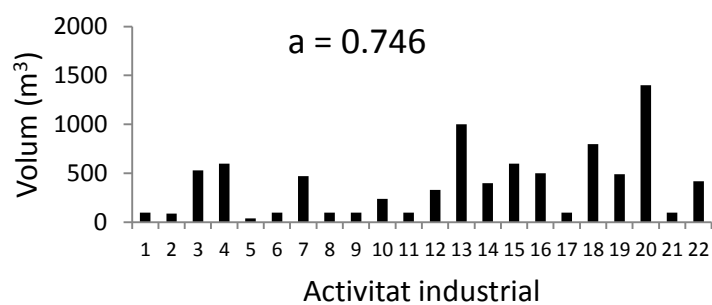


Figura 5.44. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 0.746$.

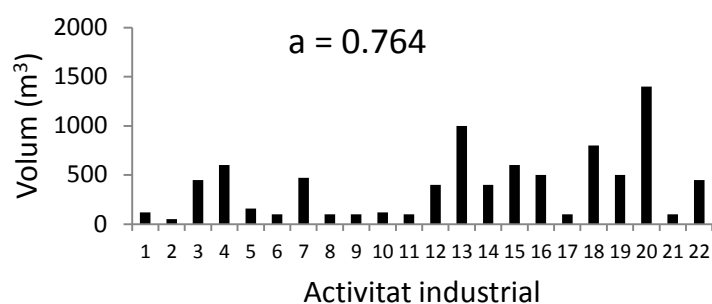


Figura 5.45. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 0.764$.

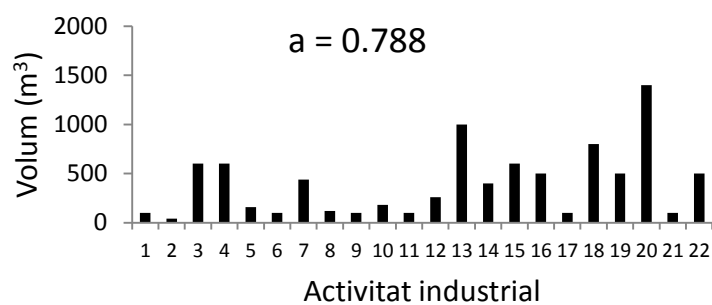


Figura 5.46. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 0.788$.

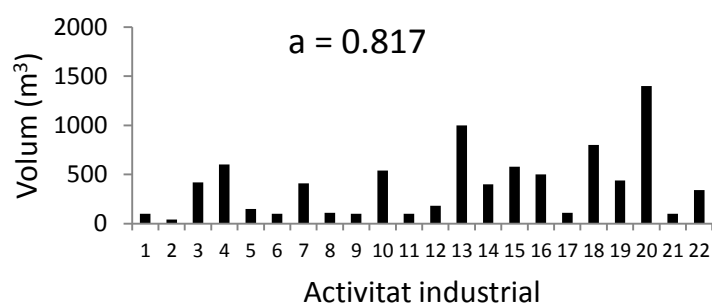


Figura 5.47. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 0.817$.

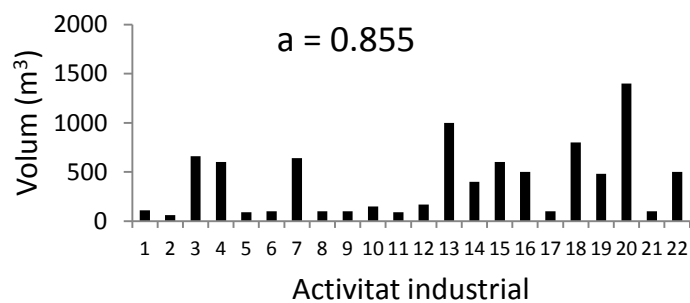


Figura 5.48. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 0.855$.

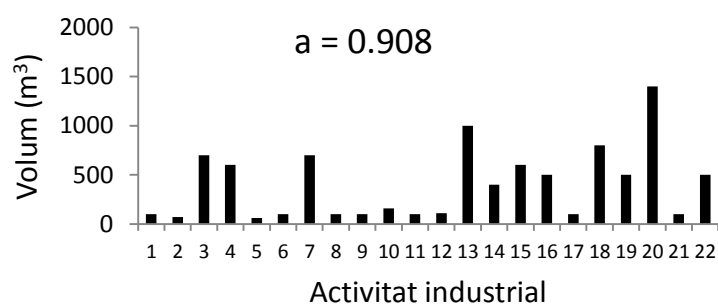


Figura 5.49. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 0.908$.

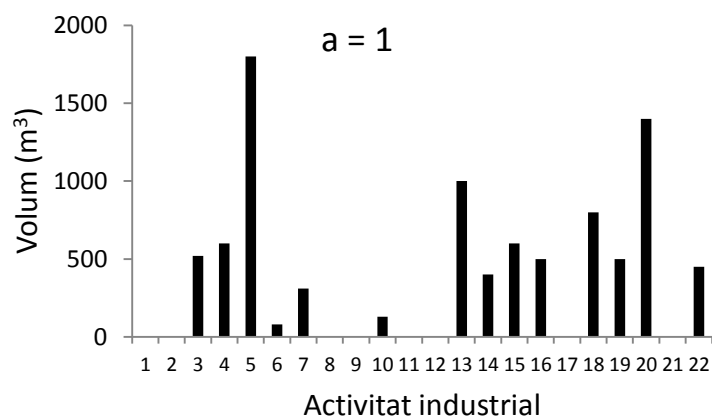


Figura 5.50. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 1$.

Per aquest valor del paràmetre a s'observa que les activitats industrials 5, 13, 18 i 20 són les que presenten una major descàrrega, amb un 96.15% de descàrrega del volum que tenien inicialment retintut. Aquest volum retintut és un 45.45% del volum total inicial als tancs de retenció, i descarreguen un 55% del volum total descarregat.

En aquesta gràfica també s'observa que les activitats 1, 2, 8, 9, 11, 12, 17 i 21 no presenten abocament, i que les activitats 6 i 10 aboquen molt poca quantitat d'aigua residual, un 2.31% de la totalitat de l'aigua residual que es descarrega per aquest valor del paràmetre, la qual cosa és deguda a les restriccions.

Els altres dos paràmetres importants en la quantificació de les aigües residuals descarregades són sòlids en suspensió (MES) i demanda bioquímica d'oxigen (DBO). L'aigua residual resultant presenta un contingut del 46.05% de la càrrega de MES admissible a l'EDAR i un 55.29% de la càrrega de DBO admissible.

Seguidament es representa a la Figura 5.51 els perfils dels volums retinguts als dipòsits i els volums d'abocament per aquest escenari.

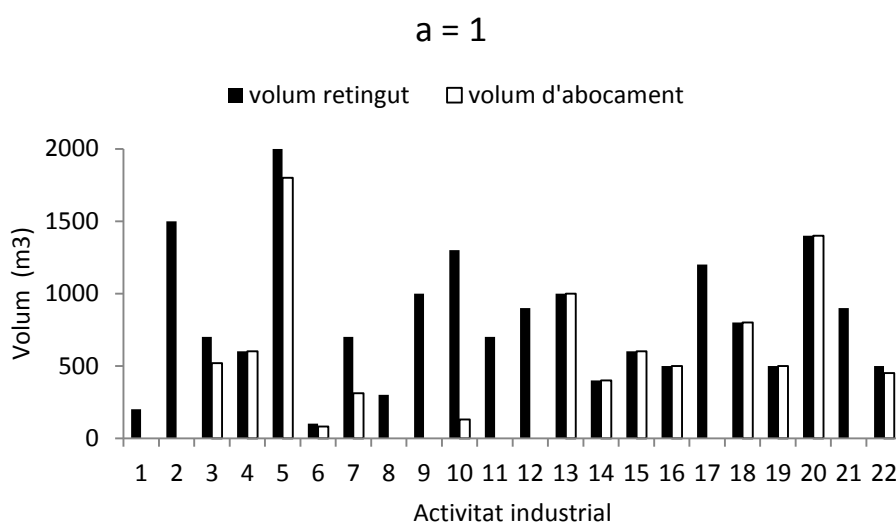


Figura 5.51. Relació entre el volum retingut i el volum abocat per a l'escenari 1 utilitzant l'heurístic 2.

Seguidament es mostren els resultats de les descàrregues volumètriques per a valors de $a > 1$ en aquest escenari des de la Figura 5.52 fins a la Figura 5.59.

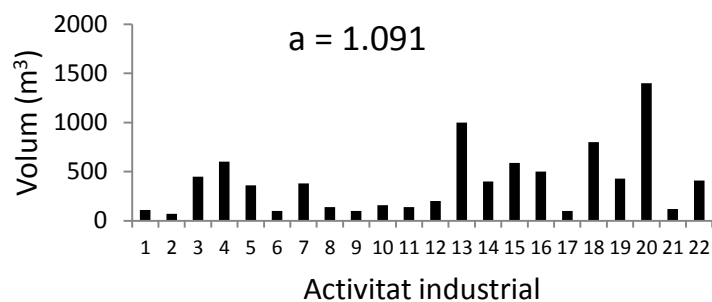


Figura 5.52. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 1.091$.

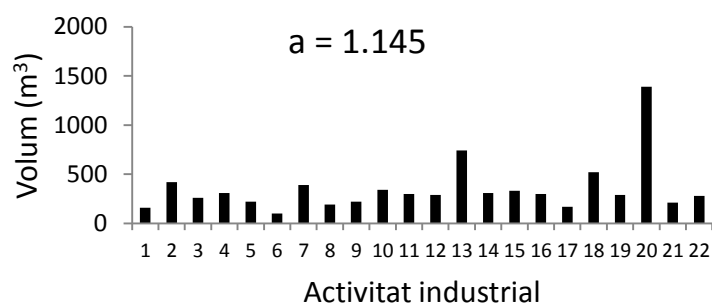


Figura 5.53. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 1.145$.

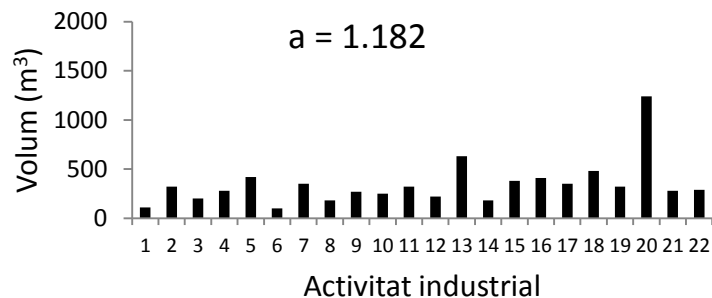


Figura 5.54. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 1.182$.

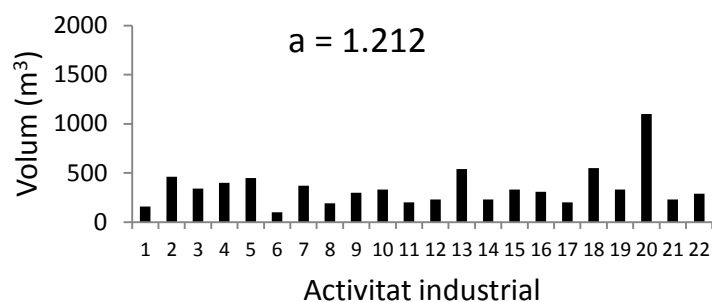


Figura 5.55. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 1.212$.

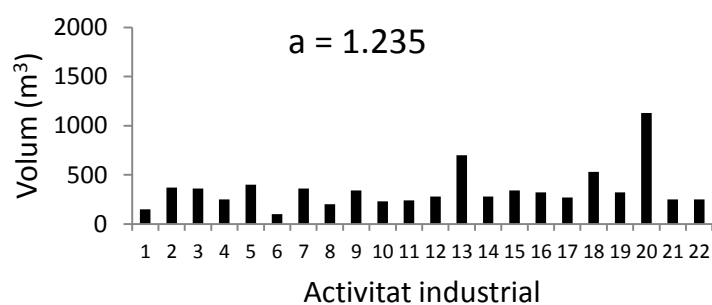


Figura 5.56. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 1.235$.

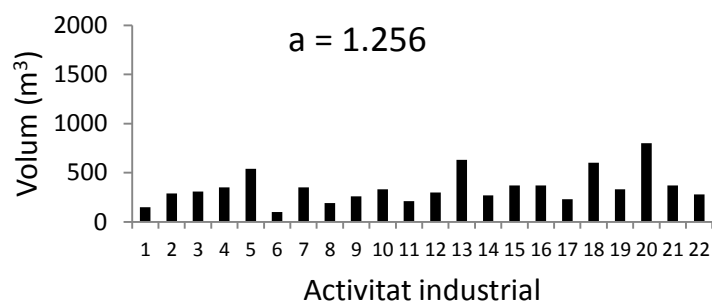


Figura 5.57. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 1.256$.

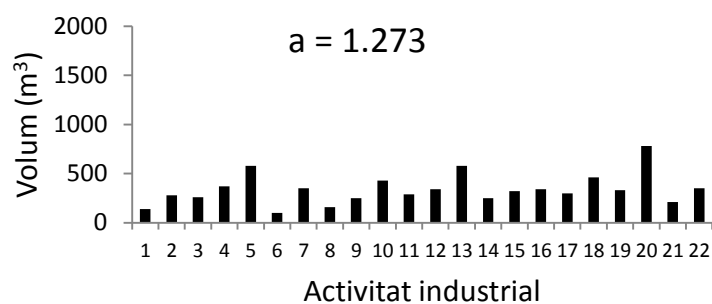


Figura 5.58. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 1.273$.

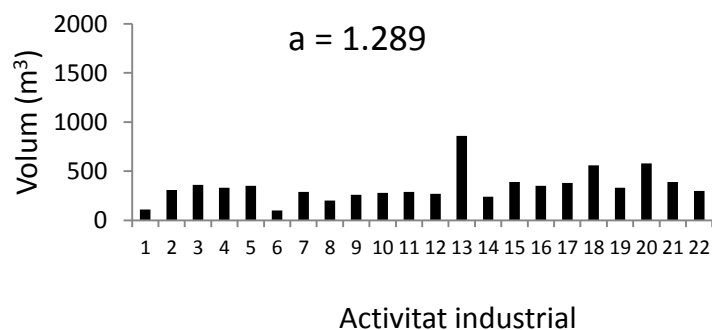


Figura 5.59. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 1.289$.

5.2.2.2 Escenari 2

Els resultats obtinguts en l'heurístic 2 (eq. 12) a l'escenari 2 (mateixos volums d'aigua residual retenguts) han estat els que es mostren a la Taula 5.8.

Taula 5.8. Resultats obtinguts en l'escenari 2 utilitzant l'heurístic 2.

Valor del paràmetre α	Volum (m ³)	MES (kg)	DBO (kg)	DQO (kg)	NT (kg)	PT (kg)
0.711	8590	3372.00	4220.50	7689.00	377.60	115.35
0.726	8610	3385.30	4245.50	7698.50	378.92	116.23
0.746	8590	3379.60	4212.00	7691.50	378.34	115.12
0.764	8600	3375.60	4211.00	7693.50	379.19	115.59
0.788	8600	3393.60	4207.00	7689.00	378.24	115.30
0.817	8600	3394.30	4205.00	7684.70	374.62	114.72
0.855	8600	3391.40	4207.50	7695.00	379.51	115.41
0.908	8600	3378.00	4222.00	7692.00	380.20	116.08
1.000	9060	3658.50	4542.50	7652.80	382.60	118.74
1.091	8160	3219.10	4164.25	7660.45	356.85	108.69
1.145	7650	3076.60	4048.50	7656.95	360.76	101.59
1.182	7500	3030.80	3931.00	7647.95	362.90	106.75
1.212	7500	2976.60	3916.75	7650.50	368.14	97.82
1.235	7550	2873.30	3938.00	7646.70	360.03	89.65
1.256	7580	2859.00	3851.00	7636.50	355.67	98.04
1.273	7380	2733.00	3870.50	7617.40	368.88	94.22
1.289	7440	2880.40	3947.50	7649.20	375.64	99.60

En les representacions gràfiques s'observa que les descàrregues segueixen la mateixa tendència observada per als costos (Figura 5.40). Quan α és igual a 1, el volum d'abocament presenta el màxim d'aquest escenari amb un valor de 9060 m³. Aquest volum és un 82.36% del total del volum admissible a l'EDAR, que conté un 99.38% de la càrrega de DQO admissible.

La raó per la qual no s'aboca la totalitat del volum admissible són les restriccions sobre les càrregues contaminants. Tal i com es pot observar el contaminant DQO aboca quasi la totalitat de la màxima càrrega de DQO possible.

La representació gràfica de la distribució de la seqüència de descàrregues associada a cada solució de cost amb cadascun dels valors del paràmetre α testats es mostren a continuació.

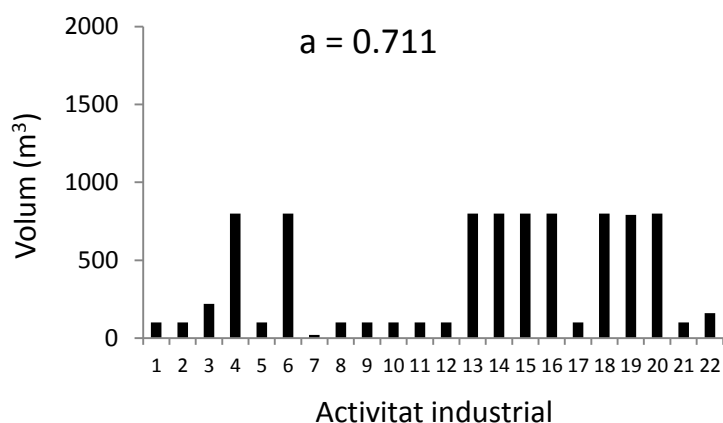


Figura 5.60. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 0.711$.

Per aquest valor del paràmetre a s'observa que les activitats industrials 4, 6, 13, 14, 15, 16, 18, 19 i 20 són les que presenten una major descàrrega, amb un 100% de descàrrega del volum que tenien inicialment retintut, i descarreguen un 83.81% del volum total descarregat amb aquest valor del paràmetre.

A continuació es mostren les distribucions de descàrregues assolides pels paràmetres [0.726, 1.289], fent especial èmfasi als resultats obtinguts per a un valor de $a = 1$.

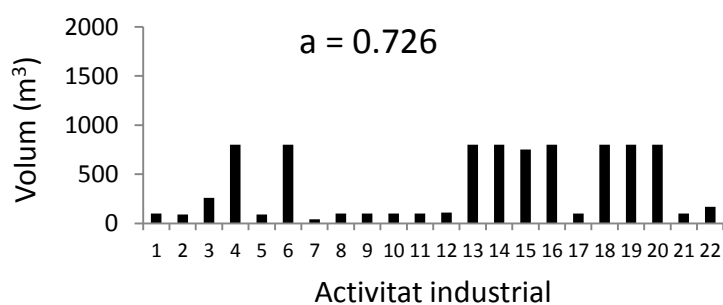


Figura 5.61. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 0.726$.

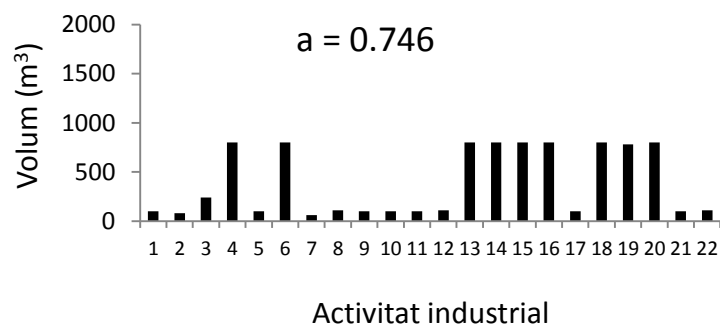


Figura 5.62. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 0.746$.

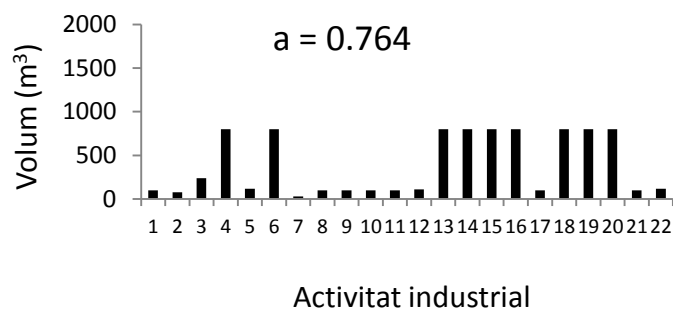


Figura 5.63. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 0.764$.

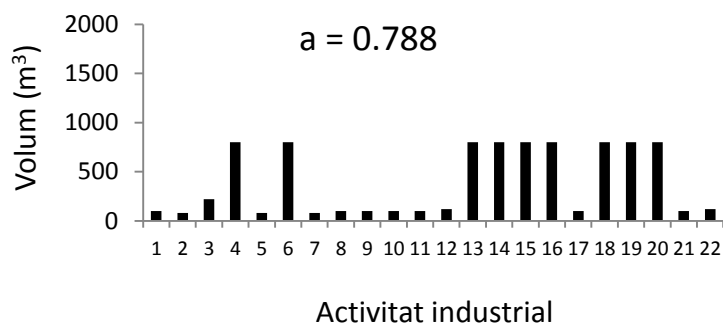


Figura 5.64. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 0.788$.

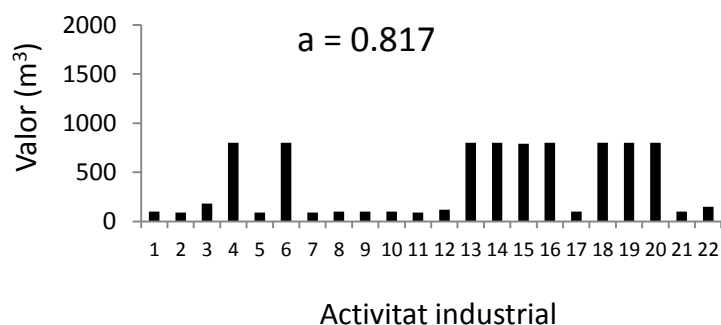


Figura 5.65. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 0.817$.

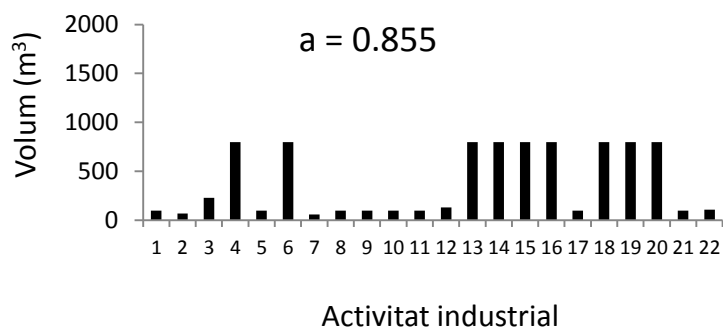


Figura 5.66. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 0.855$.

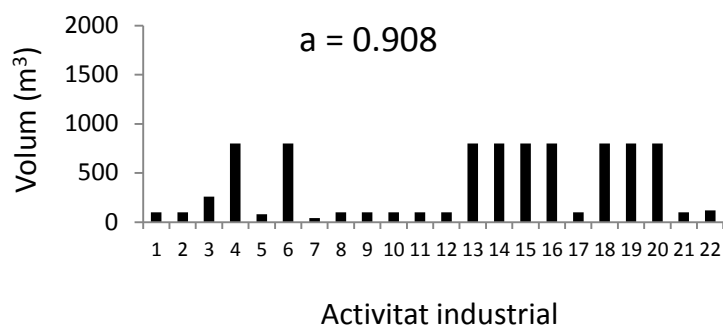


Figura 5.67. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 0.908$.

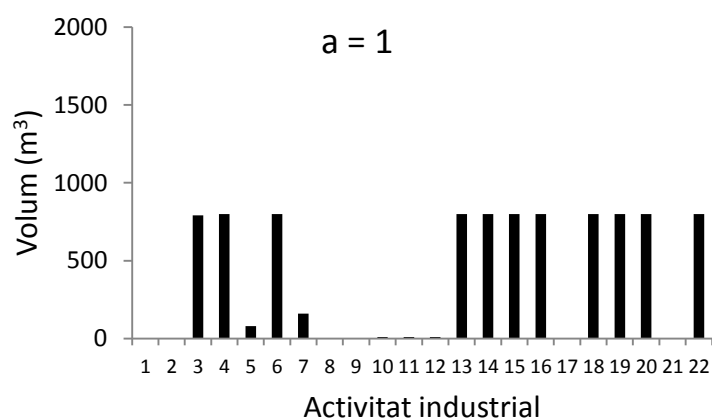


Figura 5.68. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 1$.

Per aquest valor del paràmetre a s'observa que les activitats industrials 3, 4, 6, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 20 i 22 són les que presenten una major descàrrega, amb un 99.88% de descàrrega del volum que tenien inicialment retintut. Aquest volum retintut és un 72.64% del volum total als

tancs de retenció. Aquestes activitats descarreguen un 88.18% del volum total descarregat amb aquest valor del paràmetre.

En aquesta gràfica també s'observa que les activitats 1, 2, 8, 9, 17 i 21 no presenten abocament, i que les activitats 5, 7, 10, 11 i 12 aboquen molt poca quantitat d'aigua residual, un 2.98%, la qual cosa és deguda a les restriccions imposades.

Per altra banda, l'aigua residual descarregada conté un 47.51% de la càrrega admissible de MES i un 63.53% de la càrrega de DBO admissible.

A continuació es representa la diferència entre el volum retingut i el volum d'abocament obtingut per aquest escenari.

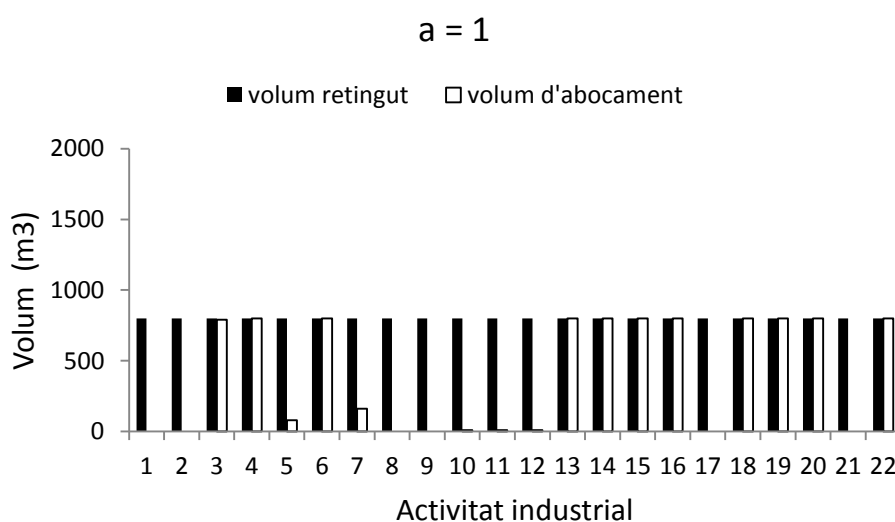


Figura 2.69. Relació entre el volum retingut i el volum abocat per a l'escenari 2 utilitzant l'heurístic 2.

Els perfils volumètrics obtinguts per a valors del paràmetre $\alpha > 1$ es mostren des de la Figura 5.70 fins a la Figura 5.77.

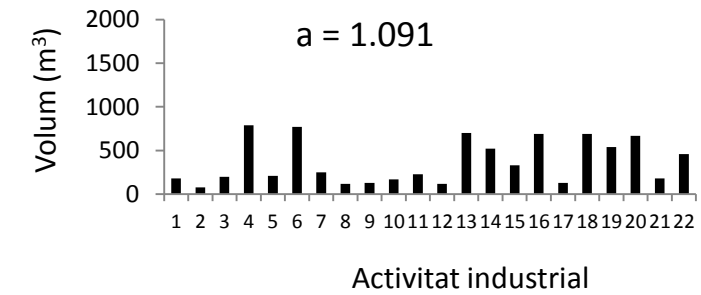


Figura 5.70. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 1.091$.

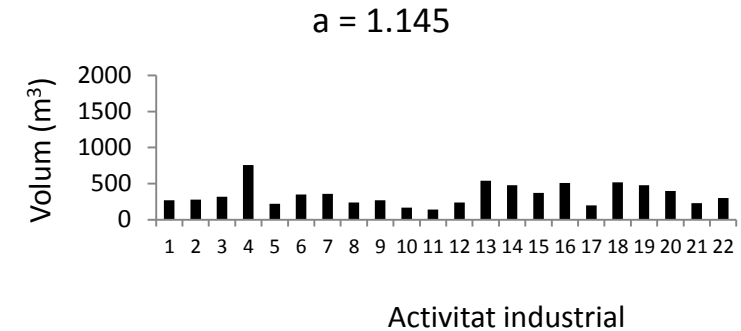


Figura 5.71. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 1.145$.

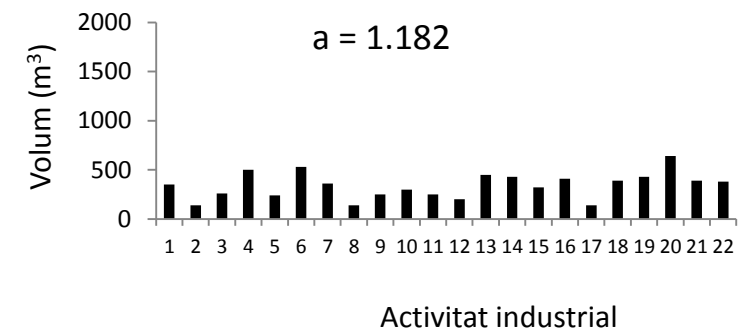


Figura 5.72. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 1.182$.

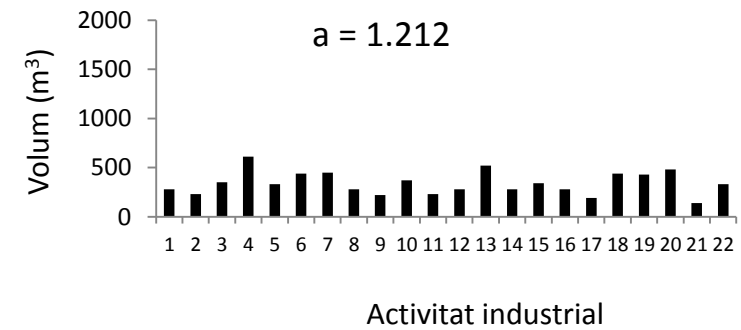


Figura 5.73. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 1.212$.

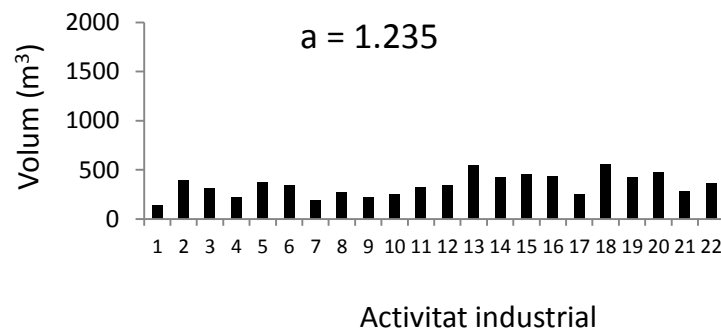


Figura 5.74. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 1.235$.

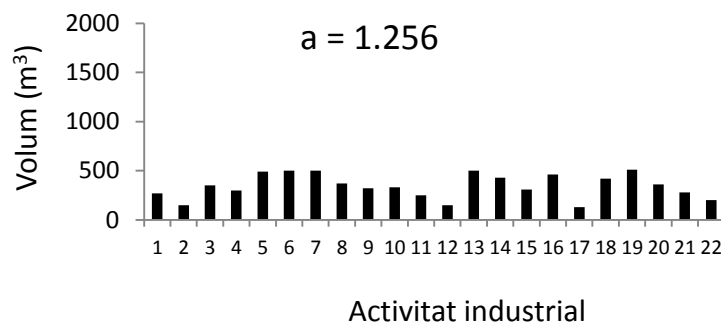


Figura 5.75. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 1.256$.

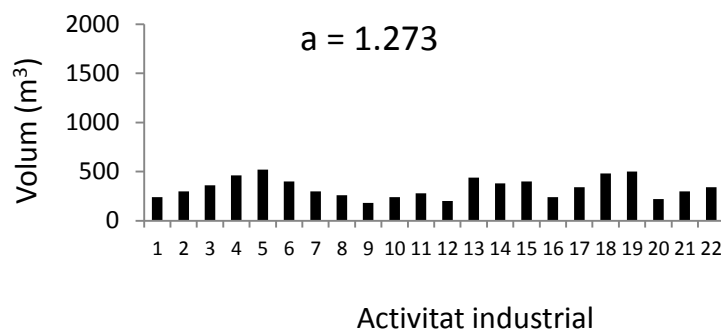


Figura 5.76. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 1.273$.

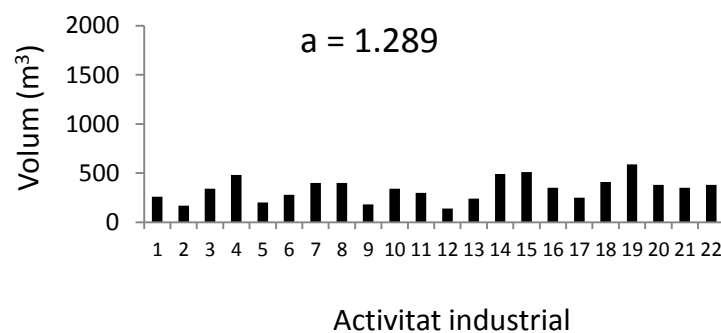


Figura 5.77. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 2 i un valor del paràmetre $a = 1.289$.

Tal com passava a l'heurístic 1 (eq. 11), a mesura que el valor del paràmetre a s'incrementa, els resultats empitjoren notablement.

5.3 Funció heurística 3

Tal i com s'ha definit al capítol 4 la funció heurística 3 és la següent:

$$\eta_{ij} = \frac{QL_{\max}}{1 + bc^{-N_{ij}}} \quad (\text{eq. 13})$$

Els resultat obtinguts en les simulacions amb aquesta funció són els que s'exposen a continuació. On primer es pot observar l'evolució dels costos assolits i a continuació la distribució de les descàrregues d'aigua residual obtingudes.

5.3.1 Evolució de costos

5.3.1.1 Escenari 1

Les simulacions realitzades utilitzant l'heurístic 3 (eq. 13) i variant el paràmetre Q van obtenir els resultats de $\bar{Z}$ que es mostren en la Taula 5.9.

Taula 5.9. Taula de resultats de $\bar{Z}$ en funció del paràmetre Q per a l'escenari 1.

Valor del paràmetre Q	$\bar{Z}$ (€)
2	1937.43
3	1925.51
4	1921.58
5	1846.01
6	1994.69
7	1877.06
8	1871.14
9	1942.31
10	1964.67

S'observa que el millor resultat és quan el paràmetre Q pren el valor de 6. A continuació es representa l'evolució dels resultats obtinguts de $\bar{Z}$.

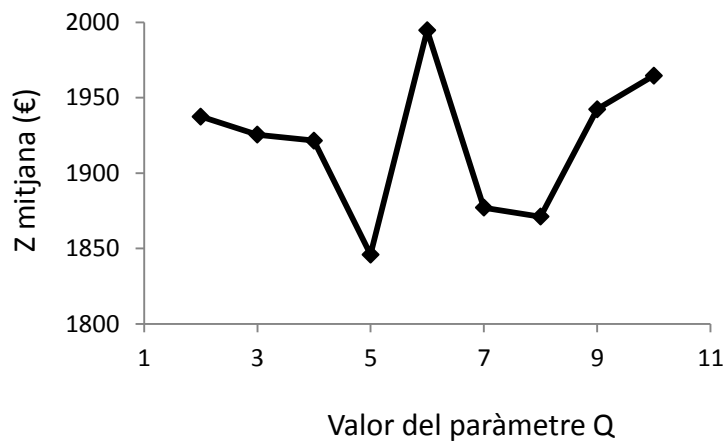


Figura 5.78. Evolució de $\bar{Z}$ en funció del paràmetre Q per a l'escenari 1 utilitzant l'heurístic 3.

Comparant els resultats d'aquest heurístic 3 per a l'escenari 1 amb els resultats obtinguts utilitzant els heurístics 1 i 2 en aquest mateix escenari, s'observa un empitjorament notable de $\bar{Z}$. El millor resultat obtingut és $\bar{Z} = 1994.69$. Comparant aquest resultat amb el millor dels altres dos heurístics, s'observa un descens del 57.17%.

La Figura 5.78 mostra l'evolució de $\bar{Z}$ en funció del paràmetre Q . S'observa una elevada variabilitat en la tendència de la solució, la qual s'ha d'interpretar en relació a l'escala de valor de Z mitjans en què està representada. Cal considerar l'efecte del procediment de càlcul probabilístic que segueix l'algorisme per a la valoració de les diferències observades (la diferència màxima correspon a aproximadament 150 €).

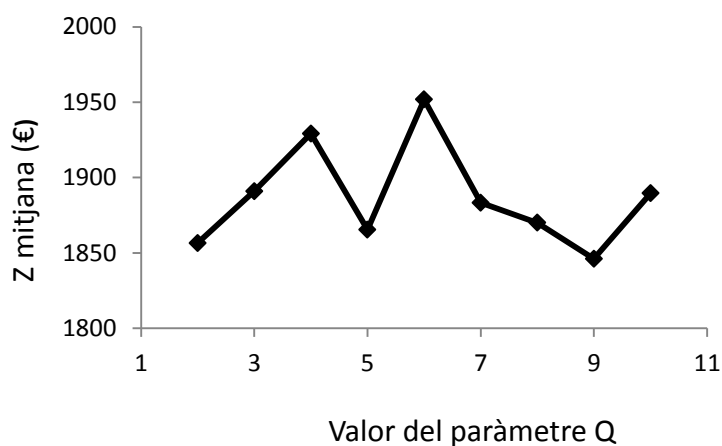
5.3.1.2 Escenari 2

A l'escenari 2 es van obtenir els resultats que es mostren a la Taula 5.10.

Taula 5.10 Taula de resultats de $\bar{Z}$ en funció del paràmetre Q per a l'escenari 2.

Valor del paràmetre Q	$\bar{Z}$ (€)
2	1856.43
3	1890.89
4	1929.13
5	1865.38
6	1951.74
7	1883.24
8	1869.99
9	1846.10
10	1889.48

Tal com passa en l'escenari 1, en l'escenari 2 també s'observa que el millor resultat és quan el paràmetre Q pren el valor de 6.


 Figura 5.79. Evolució de $\bar{Z}$ en funció del paràmetre Q per a l'escenari 2 utilitzant l'heurístic 3.

Si comparem entre heurístics i entre escenaris veiem clarament que utilitzant l'heurístic 3 (eq. 13) en els dos escenaris els resultats empitjoren notablement.

Comparant els resultats d'aquest heurístic per a l'escenari 1 amb els resultats obtinguts amb l'heurístic 2 (el qual per la seva banda obté millor resultat que l'heurístic 1), s'observa un empitjorament del 61.63% en el valor de $\bar{Z}$. El millor resultat de cost és $\bar{Z} = 1951.74$, el qual

correspon a un valor del paràmetre Q igual a 6. A la Figura 5.79 es mostra la representació gràfica dels resultats obtinguts de $\bar{Z}$ en funció del paràmetre Q .

A continuació es mostra l'evolució de les diferents descàrregues assolides per les diferents activitats industrials en funció del valor del paràmetre Q .

5.3.2 Evolució de la descàrrega d'aigua residual

5.3.2.1 Escenari 1

Els resultats de l'escenari 1 per a l'heurístic 3 (eq. 13) es mostren a la Taula 5.11.

Taula 5.11. Resultats obtinguts en l'escenari 1 utilitzant l'heurístic 3.

Valor del paràmetre Q	Volum (m^3)	MES (kg)	DBO (kg)	DQO (kg)	NT (kg)	PT (kg)
2	7140	2782.00	3894.00	7660.20	362.29	82.07
3	7230	2807.50	3868.50	7661.90	364.09	83.87
4	7170	2850.50	3896.50	7668.00	366.86	86.14
5	7080	2751.40	3873.00	7672.20	366.08	85.45
6	7160	2786.40	3864.75	7658.10	361.74	86.08
7	7160	2823.60	3900.50	7670.10	362.52	86.68
8	7180	2800.20	3906.25	7660.30	359.86	84.78
9	7190	2819.50	3912.50	7663.30	355.46	83.78
10	7140	2775.00	3892.75	7664.50	362.59	85.07

S'observa que quan es descarrega més volum del tanc de retenció és quan el valor del paràmetre Q pren el valor de 3.

En les representacions gràfiques s'observa que les descàrregues segueixen una tendència irregular, però similar a la tendència observada per als costos (Figura 5.78). Quan Q és igual a 3, el volum d'abocament presenta el màxim d'aquest escenari amb un valor de $7230 m^3$. Aquest volum és un 65.73% del total del volum admissible a l'EDAR, que conté un 99.51% de la càrrega de DQO admissible.

La representació gràfica de la seqüència de descàrregues associada a cada solució de cost amb cadascun dels valors del paràmetre testats es mostren a continuació, fent especial incís en el primer valor testat ($Q = 2$) i el que obté millor solució ($Q = 3$).

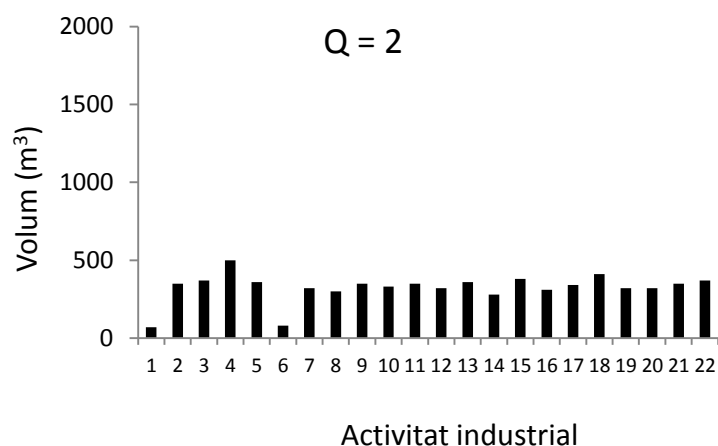


Figura 5.80. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 3 i un valor del paràmetre $Q = 2$.

Per aquest valor del paràmetre Q s'observa que les activitats industrials 1 i 6 presenten un abocament molt baix. La resta de les activitats industrials aboquen una quantitat constant però notablement inferior a la observada amb els heurístics 1 i 2, obtenint-se així uns resultats de menys qualitat.

Seguidament es mostren les distribucions de descàrrega assolides pels paràmetres [3, 10].

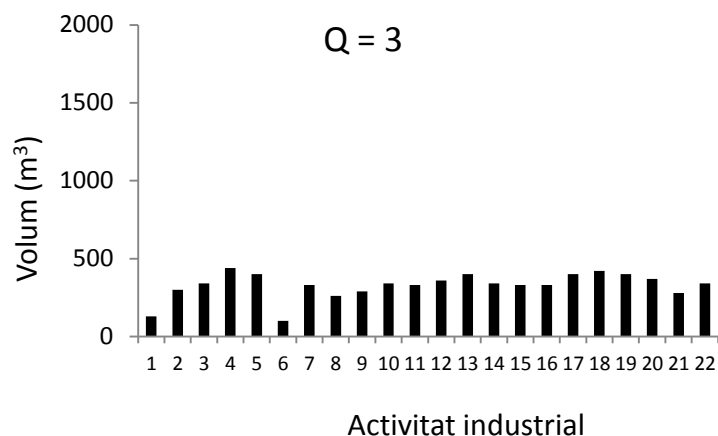


Figura 5.81. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 3 i un valor del paràmetre $Q = 3$.

Per aquest valor del paràmetre Q s'obté una descàrrega volumètrica del 65.73% del total admissible a l'EDAR. En la Figura 5.81 s'observa un perfil volumètric constant però notablement inferior als millors resultats obtinguts utilitzant els heurístics 1 i 2.

Així mateix s'observa que les activitats industrials 1 i 6 presenten poca descàrrega d'aigua residual.

La descàrrega total d'aigua residual conté un 36.46% de la càrrega admissible de MES i un 54.10% de la càrrega de DBO admissible.

A continuació es mostra la diferència entre el volum retingut i el volum que s'obté per a l'abocament des de cada tanc de retenció per aquest escenari.

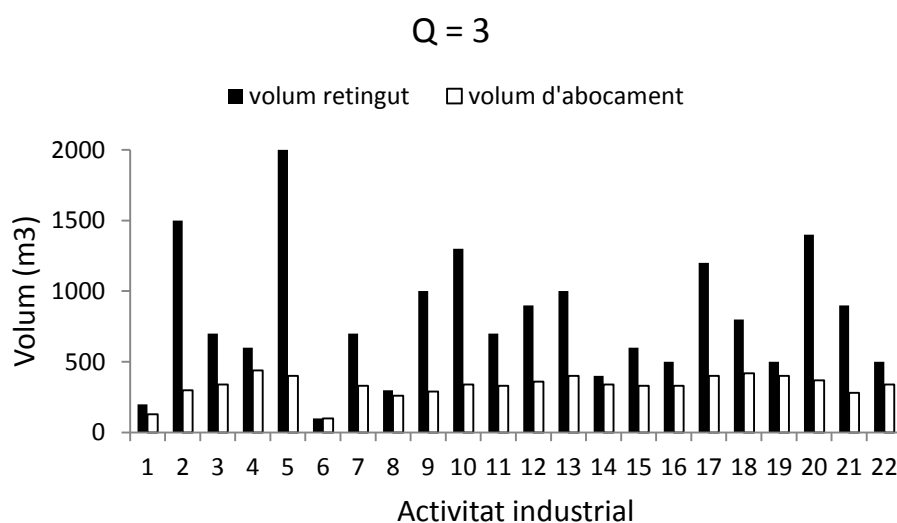


Figura 5.82. Relació entre el volum retingut i el volum abocat per a l'escenari 1 utilitzant l'heurístic 3.

En la Figura 5.82 s'observa que l'abocament no segueix de forma tant evident com ho fan els heurístics 1 i 2 el perfil volumètric d'aigua residual retinguda, descarregant-ne un volum menor.

Seguidament es mostren els resultats restants del paràmetre Q , des de $Q = 4$ fins a $Q = 10$, que correspon a partir de la Figura 5.83 fins a la Figura 5.89.

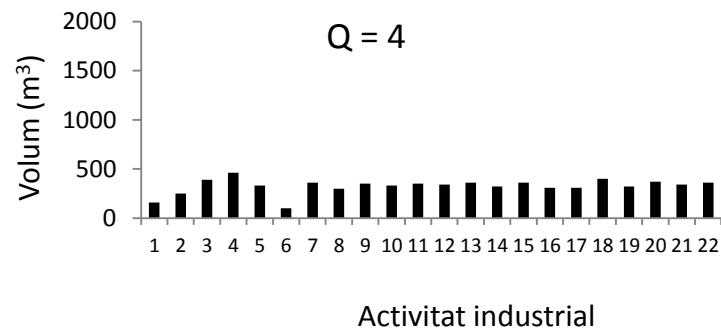


Figura 5.83. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 3 i un valor del paràmetre $Q = 4$.

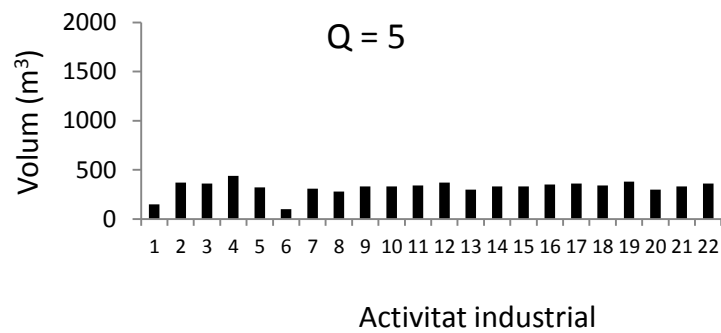


Figura 5.84. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 3 i un valor del paràmetre $Q = 5$.

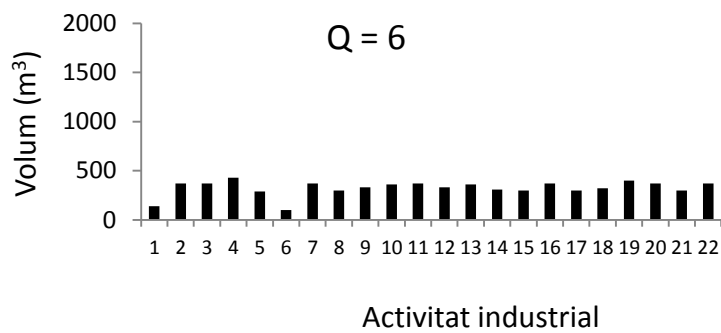


Figura 5.85. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 3 i un valor del paràmetre $Q = 6$.

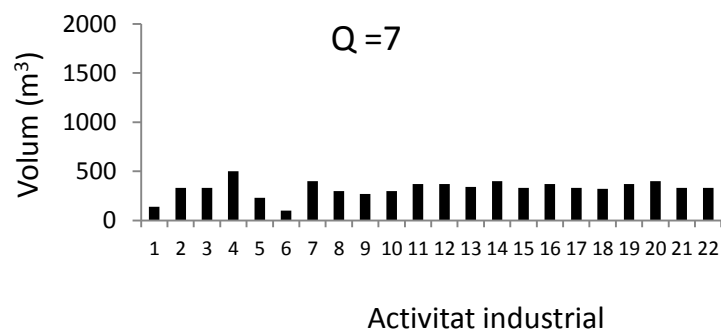


Figura 5.86. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 3 i un valor del paràmetre $Q = 7$.

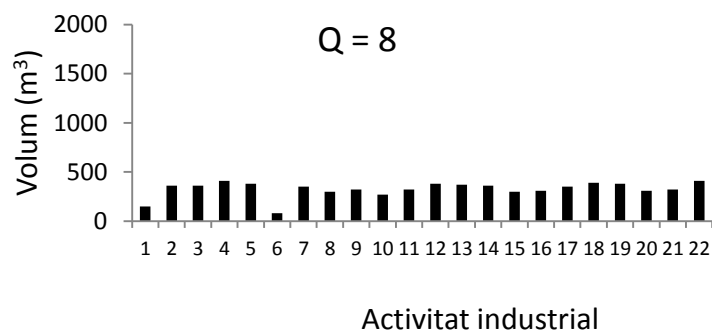


Figura 5.87. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 3 i un valor del paràmetre $Q = 8$.

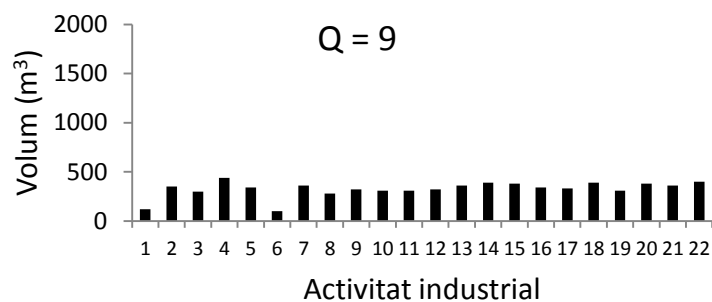


Figura 5.88. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 3 i un valor del paràmetre $Q = 9$.

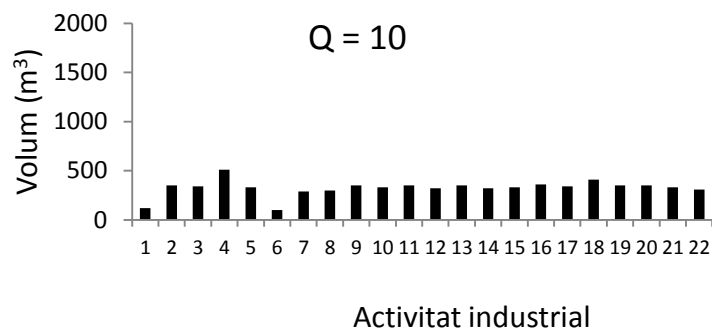


Figura 5.89. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 3 i un valor del paràmetre $Q = 10$.

5.3.2.2 Escenari 2

Els resultats obtinguts per a l'escenari 2 utilitzant l'heurístic 3 (eq. 13) es mostren en la Taula 5.12.

Taula 5.12. Resultats obtinguts en l'escenari 2 utilitzant l'heurístic 3.

Valor del paràmetre Q	Volum (m^3)	MES (kg)	DBO (kg)	DQO (kg)	NT (kg)	PT (kg)
2	7030	2744.00	3865.00	7684.10	368.77	91.18
3	7070	2778.80	3860.00	7685.75	370.98	94.69
4	7060	2755.40	3893.00	7680.70	376.90	94.00
5	7040	2758.90	3865.75	7679.80	369.58	93.84
6	7140	2798.20	3894.25	7678.90	370.46	95.61
7	7200	2800.20	3866.50	7690.60	376.23	95.83
8	7110	2794.00	3892.25	7686.50	370.63	95.32
9	7060	2787.80	3851.00	7685.70	372.36	95.38
10	7120	2772.80	3832.50	7678.50	362.58	90.72

S'observa que quan es descarrega més volum del tanc de retenció és quan el valor del paràmetre Q pren el valor de 7.

En les representacions gràfiques s'observa que les descàrregues segueixen una tendència irregular, però similar a la tendència observada per als costos (Figura 5.79). Quan Q és igual a 7, el volum d'abocament presenta el màxim d'aquest escenari amb un valor de $7200 m^3$. Aquest volum és un 65.45% del total del volum admissible a l'EDAR, i conté un 99.88% de la càrrega de DQO admissible.

Tot i que els volums de descàrrega obtinguts per a cada activitat industrial són similars, si comparem entre heurístics i entre escenaris veiem clarament que amb l'heurístic 3, ambdós escenaris obtenen pitjors resultats.

Les representacions gràfiques de la seqüència de descàrregues associada a cada solució de cost amb cadascun dels valors del paràmetre testat Q amb valors dins de l'interval $[3, 10]$ es mostren a continuació. Es fa especial èmfasi al millor resultat obtingut el qual correspon a un valor de $Q = 7$.

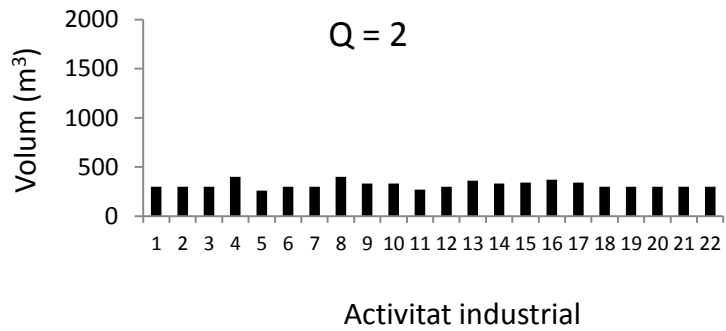


Figura 5.90. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 3 i un valor del paràmetre $Q = 2$.

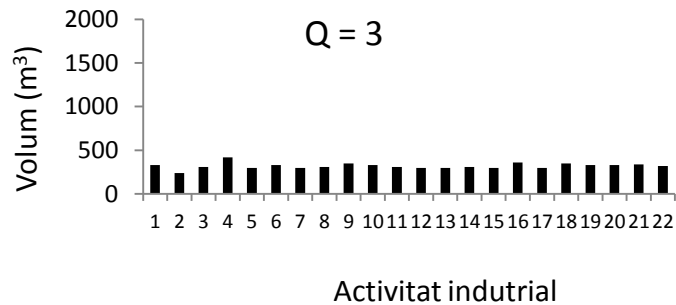


Figura 5.91. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 3 i un valor del paràmetre $Q = 3$.

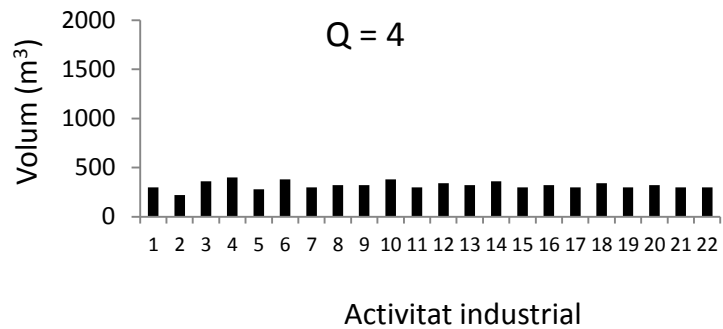


Figura 5.92. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 3 i un valor del paràmetre $Q = 4$.

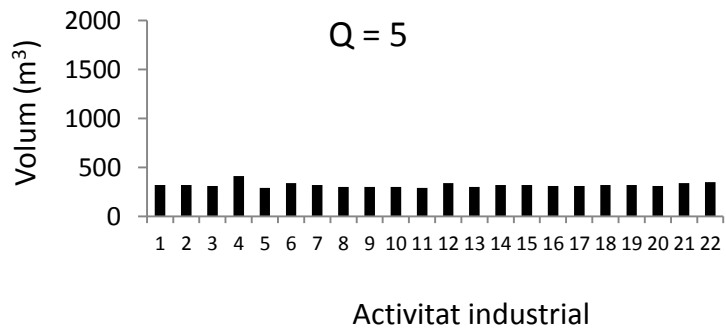


Figura 5.93. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 3 i un valor del paràmetre $Q = 5$.

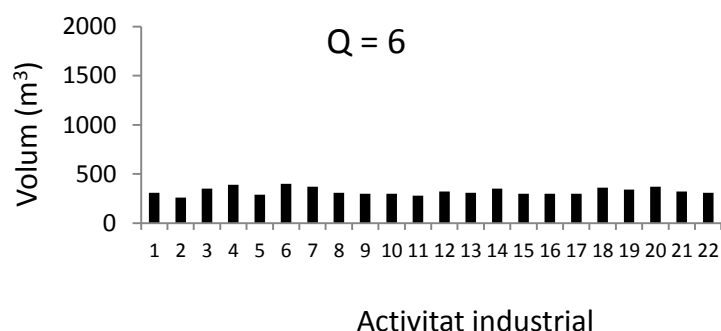


Figura 5.94. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 3 i un valor del paràmetre $Q = 6$.

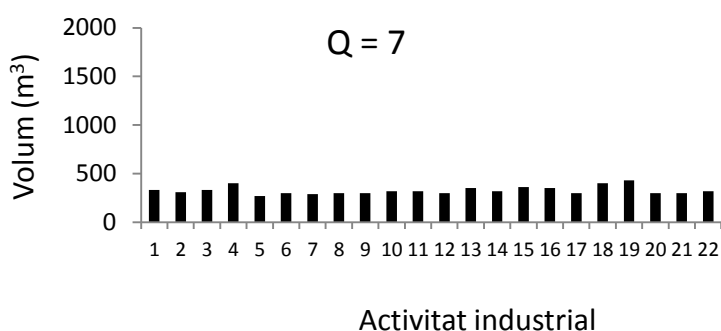


Figura 5.95. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 3 i un valor del paràmetre $Q = 7$.

Per aquest valor del paràmetre Q s'obté una descàrrega volumètrica del 65.45% del total admissible a l'EDAR. Es pot apreciar en la Figura 5.95 que es tracta d'un perfil volumètric constant. La descàrrega total d'aigua residual obtinguda conté un 36.36% de la càrrega de MES admissible a l'EDAR i un 53.24% de la càrrega de DBO admissible.

Si comparem els resultats obtinguts per aquest escenari utilitzant l'heurístic 3 amb els resultats obtinguts utilitzant els heurístics 1 i 2, s'observa un empitjorament considerable dels resultats. Per tant aquest no és un heurístic gaire adequat per a fer les descàrregues volumètriques d'ambdós escenaris.

A continuació es representa el perfil volumètric entre el volum retingut i el volum que s'aboca des de cada tanc de retenció per a aquest escenari.

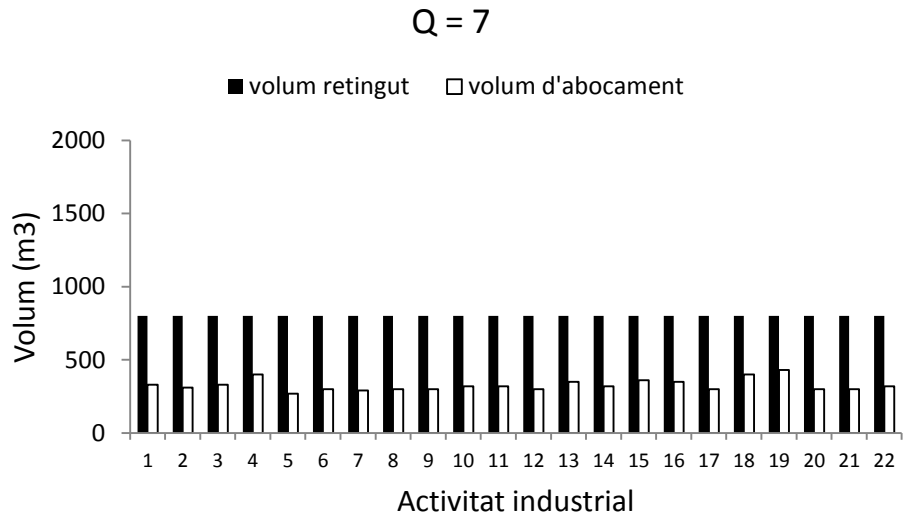


Figura 5.36. Relació entre el volum retingut i el volum abocat per a l'escenari 2 utilitzant l'heurístic 3.

S'observa com amb aquest heurístic s'obté una descàrrega de volum notablement inferior a l'obtinguda utilitzant els heurístics 1 i 2.

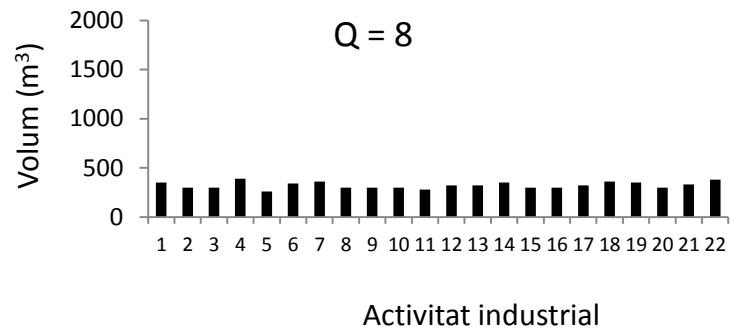


Figura 5.97. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 3 i un valor del paràmetre $Q = 8$.

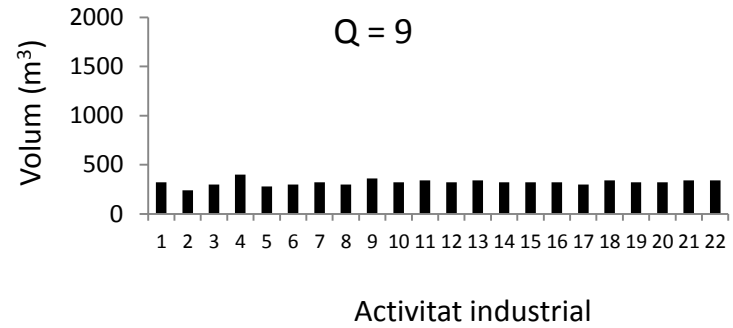


Figura 5.98. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 3 i un valor del paràmetre $Q = 9$.

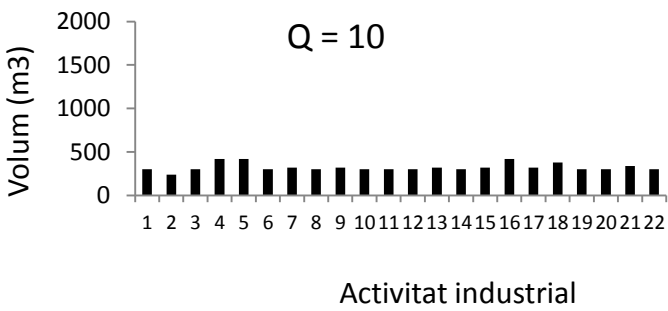


Figura 5.99. Distribució del volum de descàrrega obtingut amb l'heurístic 3 i un valor del paràmetre Q = 10.

5.4 Resum dels millors resultats obtinguts pels heurístic 1, 2 i 3

A continuació a la Taula 5.13 es mostren els millors resultats de $\bar{Z}$ obtinguts per a cada funció heurística, diferenciant entre els dos escenaris utilitzats. En ella s'observa que a la funció heurística 2 (amb un valor del paràmetre $a = 1$) és el que obté millor resultat mitjà de la funció maximitzada Z , tant per l'escenari 1 com per l'escenari 2.

Taula 5.13. Resum dels millors resultats de $\bar{Z}$ obtinguts en els escenaris 1 i 2 utilitzant les funcions heurístiques 1, 2 i 3.

Funció heurística	Escenari	Valor del paràmetre (a o Q)	Valor de $\bar{Z}$ (€)
1	1	$a = 1$	4642.52
	2	$a = 1$	5082.53
2	1	$a = 1$	4658.13
	2	$a = 1$	5086.19
3	1	$Q = 6$	1994.69
	2	$Q = 6$	1951.74

A la Taula 5.14 es mostren els millors resultats de descàrrega obtinguts per a cada funció heurística, diferenciant entre els dos escenaris utilitzats.

Taula 5.14. Resum dels millors resultats de descàrrega de volum obtinguts en els escenaris 1 i 2 utilitzant les funcions heurístiques 1, 2 i 3.

Heurístic	Escenari	Valor del paràmetre (a o Q)	Volum de descàrrega (m^3)	MES (kg)	DBO (kg)	DQO (kg)	NT (kg)	PT (kg)
1	1	$a = 1$	9020	3530.00	3920.00	7640.40	283.25	84.44
	2	$a = 1$	9060	3684.20	4547.50	7646.50	380.78	118.60
2	1	$a = 1$	9090	3546.50	3953.00	7681.70	286.50	85.91
	2	$a = 1$	9060	3658.50	4542.50	7652.80	382.60	118.74
3	1	$Q = 3$	7230	2807.50	3868.50	7661.90	364.09	83.87
	2	$Q = 7$	7200	2800.20	3866.50	7690.60	376.23	95.83

6 RESUM DEL PRESSUPOST

La realització del present estudi ascendeix a sis mil tres – cents vuitanta – un amb setanta – sis euros (6381.76€).

El seu desglossament es presenta a l'annex d'aquest document.

7 CONCLUSIONS

Aquest estudi es conclou amb l'assoliment dels objectius proposats:

- La gestió de l'EDAR d'aigües residuals industrials procedents d'activitats industrials és una activitat complexa i per això es creu oportú plantejar solucions per regular la càrrega contaminant a tractar.
- Una de les solucions per a millorar les condicions de treball de l'EDAR és la utilització de mètodes algorísmics amb capacitat per a gestionar les seves entrades.
- Els algorismes ACO, en especial, el Max – Min es mostren com un mètode d'optimització amb capacitat per a resoldre el problema.
- S'han provat tres funcions matemàtiques per a la optimització de la composició de les entrades a l'EDAR. La primera i la segona funció són potencials, mentre que la tercera s'anomena logística.
- Els resultats assolits en les execucions demostren la influència, per aquests tipus d'escenaris de l'equació heurística inclosa en la regla de transició d'estat. Els valors obtinguts per a les diferents funcions heurístiques han estat diferents.
- Les funcions que obtenen millors resultats d'entre els provats són els que estan basats en el terme potencial (funcions 1 i 2). Essent la funció que inclou els pesos dels diferents contaminants (funció 2) la que obté el millor resultat.
- Per aquesta funció 2 el valor del paràmetre α que assoleix millor resultat és 1, de forma que l'expressió quedaria en la forma:

$$\eta_{ij} = N_i^j \sum_{r=1}^5 C_i^r w^r$$

- Aquest heurístic afavoreix la descàrrega de les activitats industrials amb majors volums retinguts i majors càrregues dels contaminants DQO, MES i DBO.

- Al llarg d'aquest estudi s'ha pogut confirmar que treballant amb els algorismes ACO es pot optimitzar les condicions d'entrada d'aigües residuals industrials a l'EDAR, per tal que aquesta sigui capaç de funcionar en les millors condicions possibles (respecte a l'influent).

8 BIBLIOGRAFIA

- [1]. Universitat de Girona. *www.udg.edu*. Consultat el 02 / 03 / 2014, a http://www3.udg.edu/publicacions/vell/electroniques/gestio_aigues_residuals/presentacio.html.
- [2]. Mundociencias. *www.mundociencias.com*. Consultat el 24 / 03 / 2014, a <http://mundociencias.wordpress.com/category/3%C2%BA-eso-byg>.
- [3]. Agència Catalana de l'Aigua. *www.aca.cat*. Consultat el 12 / 03 / 2014, a http://aca-web.gencat.cat/aca/appmanager/aca/aca?_nfpb=true&_pageLabel=P1204854461208200535758.
- [4]. Manual directiva 91/271/CEE. Sobre el tratamiento de la aguas residuales urbanes. Manual de interpretación y elaboración de informes.
- [5]. Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering. Treatment, Disposal and Reuse. McGraw-Hill. 1991.
- [6]. Massé D.I., Massé L. Characterization of wastewaters from hog slaughterhouses in Easter Canada and evalutation of their in-plant wastewater treatment systems. Canadian Agricultural Engineering. 2000; 143-144.
- [7]. Álvarez J., Hugh S., Cuba N., Loza – Murguia M. Evaluation of a treatment system wastewater prebeneficiado of coffee (Coffea arabica) implemented in the community Carmen Pampa province of Nor Yungas of La Paz Department. Journey of the Selva. 2011; 38-40.
- [8]. Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España del sector cervecero. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 2005; 61.
- [9]. Patel S., Modi D.A., Rathod N.P., Chavda G.R., Parmar D.K. Physico – chemical analysis of effluents from Havmor Ice – cream industry. International Journal of Advanced Biosciences. 2013; 8.

- [10]. Vishakha S., Kulkarni S. W., Minal W. Physicochemical characterization of dairy effluents. International Journal at Life Sciences Biotechnology and Pharma Research. 2013; 184-187.
- [11]. Aplicació de les Millors Tècniques Disponibles en l'elaboració del vi i cava. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 2011; 53-56.
- [12]. Amaral C., Lucas M. S., Coutinho J., Crespí, A. L., do Rosário A. M., Pais, C. Microbiological and phsycochemical characterization of olive mill wastewaters from a continuous olive mill in Northeastern Portugal. Bioresource Technology. 2008; 7217-7219.
- [13]. Universidad de Granada. [www.ugr.es](http://www.ugr.es/~mgroman/archivos/TARI/teari-3.pdf). Consultat el 15 / 04 / 2014 a, <http://www.ugr.es/~mgroman/archivos/TARI/teari-3.pdf>.
- [14]. Thompson G., Swain J., Kay M., Forster C.F. The treatment of pulp and paper mill effluent: a review. Bioresource Technology. 2001; número: 280.
- [15]. Jing-Ming L., Yan X., Hui L., Zhi-Rong Z., Shu-Yuan Q. Pilot study on chemical industrial wastewater in tertiary treatment with biofilm for washing belts. Environment Protection Engineering. 2011; 96.
- [16]. Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España del Sector de Química Fina Orgánica. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 2006; 89.
- [17]. Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España del sector refino de Petróleo. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 2004; 215.
- [18]. Kavitha R.V., Krishna V., Makam R. Physico – Chemical Analysis of Efluentes from Pharmaceutical Industry and its Efficiency Study. 2012; 106.
- [19]. Wang L., Hung Y. T., Lo H. Yapiyakis, C. Handbook of Industrial and Hazardous Wastes Treatment. 2004; 68.

- [20]. Ahmed S., Rath R., Chandra U. Wastewater Treatment Technologies Commonly Practised in Major Steel Industries in India; 2.
- [21]. Rohit K.C., Ponmurugan P. Physico-chemical analysis of textile, automobile and pharmaceutical industrial effluents. 2013; 116-117.
- [22]. Bernal – Martínez L. A., Barrera – Díaz C., Solís – Morelos C., Natividad R. Synergy eco electrotechnical and ozonation processes in industrial wastewater treatment. Chemical Engineering Journal. 2010; 76.
- [23]. Llei 15/2008, del 23 de desembre, de pressupostos de la Generalitat de Catalunya per al 2009.
- [24]. Pisinger, D. Where are the hard knapsack problems ?. Computers and Operations Research 2005; 32 (9): 2271-2284.
- [25]. Glover F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. Computers and Operations Research; 1986, 533–549.
- [26]. Osman I.H., Laporte G. Metaheuristics: A bibliography. Annals of Operations Research; 1996 63, 513–628.
- [27]. Papadimitriou C.H., Steiglitz K. Combinatorial optimization: algorithms and complexity. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA; 1982.
- [28]. Arito L. A. Algoritmos de Optimización basados en Colonias de Hormigas aplicados al Problema de Asignación Cuadrática y otros problemas relacionados.
- [29]. Grassé P-P. Recherches sur la biologie des termites champignonnistes (Macrotermitinae). Annales des Sciences Naturelles, Zoologie; 1994, 97–171.

- [30]. Grassé P-P. La reconstruction du nid et les coordinations inter-individuelles chez *bellicositermes natalensis* et *cubitermes* sp. la théorie de la stigmergie: essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs. *Insectes Sociaux*; 1959, 41–81.
- [31]. Deneubourg J.L., Aron S., Goss S., Pasteels J. M. The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant. *Journal of Insect Behavior*; 1990, 159–168.
- [32]. Goss S., Aron S., Deneubourg J. L., Pasteels J. M. Self-organized shortcuts in the argentine ant. *Naturwissenschaften*; 1990, 579–581.
- [33]. Dorigo M., Maniezzo V., Coloni, A. Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part B*; 1996, 29-41.
- [34]. Verdaguer M., Clara N., Gutiérrez, V., Poch M. Application of Ant-Colony – Optimization algorithm for improved management of first flush effects in urban wastewater systems. *Science of the Total Environment* 2014; 485-486: 143-152.
- [35]. Stützle T., Hoos H. Max – Min Ant System. *Future Generation Computer Systems*; 2000, 889–914.
- [36]. Verdaguer M. Avaluació del paradigma d'agents en la gestió d'un sistema complex d'aigües residuals. *Tesi Doctoral UdG*, 2012.
- [37]. 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.

9 GLOSSARI

a:	Paràmetre potencial de les funcions heurístiques 1 i 2
A:	Primer paràmetre de l'equació logística (funció heurística 3)
AN:	Amortització anual
AH:	Amortització per hores
AS:	Algorisme Ant System
AT:	Amortització total del projecte
avg:	Nombre mitjà de possibilitats de descàrrega en el problema particular de les aigües residuals
b:	Segon paràmetre de l'equació logística (funció heurística 3)
BI:	Benefici Industrial
c:	Tercer paràmetre de l'equació logística (funció heurística 3)
C_i^r:	Concentració del contaminant r en l'aigua residual de l'activitat industrial i
CI:	Costos Indirectes
D:	Domini de les variables en un problema d'optimització combinatòria
DBO:	Demanda bioquímica d'oxigen
DQO:	Demanda química d'oxigen
f:	Funció a maximitzar
i:	Activitat industrial
j:	Possibilitats de descàrrega volumètrica
K_i:	Relació entre el volum de la descàrrega i el volum admissible a l'EDAR
L_i:	Volum d'aigua residual retinguda al dipòsit de retenció de l'activitat industrial i
L_{max}:	Volum màxim retingut d'aigua residual en les activitats industrials

m:	Formiga
MA:	Mà d'obra
MES:	Sòlids en suspensió
$MMAS$:	Algorisme Max – Min Ant System
N_i^j:	Volums possibles de descàrregues j en l'activitat industrial i
n:	Nombre de variables considerades
NT:	Nitrogen total
p:	Persistència del rastre de feromona
p_{best}:	Probabilitat de construir la millor solució amb τ_{max}
$p_{ij}^m(t)$:	Probabilitat de que la formiga $m^{èssima}$ seleccioni el volum de descàrrega N_i^j en la iteració realitzada en el temps t
POC:	Problema d'Optimització Combinatòria
P^r:	Preu dels contaminants r
PT:	Fòsfor total
Q:	Valors experimentals testats en la funció heurística 3
r:	Conjunt dels contaminants (MES, DBO, DQO, NT i PT)
S:	Conjunt dels components
t:	Temps en què es realitza la iteració
T_i^r:	Coefficient punta calculat per a cada activitat industrial i cada contaminant
TH:	Total hores d'utilització
v:	Cost per unitat volumètrica de descàrrega
V:	Volum màxim admissible a l'EDAR
VC^1:	Càrrega de sòlids en suspensió màxima admissible a l'EDAR
VC^2:	Càrrega de demanda bioquímica d'oxigen màxima admissible a l'EDAR
VC^3:	Càrrega de demanda química d'oxigen màxima admissible a l'EDAR
VC^4:	Càrrega de nitrogen total màxima admissible a l'EDAR

VC^5 :	Càrrega de fòsfor total màxima admissible a l'EDAR
x_r :	Conjunt de variables en un problema d'optimització combinatòria
$\bar{X}_i^r$:	Concentració pre—establerta pel contaminant r i la indústria i
y_i^j :	Variables de decisió binària
Z :	Funció objectiu de cost
α :	Importància del rastre de feromona
β :	Importància de la funció heurística
η_{ij} :	Funció heurística sobre la qual s'ha desenvolupat el present treball
$\tau_{ij}(t)$:	Rastre de feromona en el temps t
τ_{min} :	Valor que pren el límit inferior del rastre de feromona
τ_{max} :	Valor que pren el límit superior del rastre de feromona
ψ :	Pes del cost de les càrregues contaminants
Ω :	Conjunt de restriccions del problema d'optimització combinatòria