

## Treball final de grau

**Estudi:** Grau en Enginyeria Química

**Títol:** Aplicació de sistemes híbrids en la gestió del recurs d'aigua urbana

**Document:** Memòria

**Alumne:** Jesmyl Elisa Cordova Cordova

**Tutor:** Marta Verdaguer Planas / Manel Poch Espallargas

**Departament:** EQATA

**Àrea:** Enginyeria Química

**Convocatòria (mes/any):** Setembre/2022

## **GLOSSARI**

Anammox: ANaerobic AMMonium OXidation.

anMBR: Anaerobic Membrane BioReactor

AOB: Ammonia Oxidizing Bacteria

BFS: Biofilm Surface

BrW: Aigües marrons

BW:Aigües negres

CAPEX: CAPital EXpenditure

DBO: Demanda Biològica d'Oxigen

DQO: Demanda Química d'Oxigen

EDAR: Estació depuradora d'Aigües Residuals

GW: Aigües grises

HDPE: Polietilè d'alta densitat

HET: Organo-Heterotrophic Bacteria

HRT: Temps de Retenció Hidràulica

MBR: Membrane BioReactor

MINLP: Mixed-Integer Non Lineal Programing

NOB: Nitrite Oxidizing Bacteria

NT: Nitrogen Total

OLAND: Oxygen-Limited Autotrophic Nitrification/Denitrification

OPEX: OPerational EXpense

PT: Fòsfor total

PVC: Clorur de polivinil

RBC: Rotating Biological Contactor

RO: Reverse Osmosis

SST: Sòlids Suspesos Totals

SSV: Sòlids Suspesos Volàtils

STR: Temps de Retenció del Sòlid

UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket

UD: Uridis Dicell

UV: Ultra Violet

YW: Aigües grogues

## ÍNDEX

<b>1. Introducció</b> .....	<b>1</b>
1.1 Antecedents .....	1
1.2 Objectiu.....	2
1.3 Abast.....	3
<b>2 Metodologia</b> .....	<b>4</b>
<b>3 Variació de patrons de pluja</b> .....	<b>8</b>
3.1 Possibles escenaris de futur .....	8
3.2 Comportament de la precipitació a Catalunya .....	9
<b>4 Projecció de demografia i distribució</b> .....	<b>14</b>
4.1 Creixement de població.....	14
4.2 Descripció d'habitatges.....	16
4.2.1 Superfície d'habitatge .....	16
4.2.2 Distribució d'habitatges.....	17
4.2.3 Persones per habitatge.....	20
4.3 Projecció 2030 i 2050 .....	22
<b>5 Balanç d'aigua</b> .....	<b>23</b>
5.1 Consum domèstic .....	23
5.2 Disponibilitat .....	25
5.3 Balanç .....	28
<b>6 Tecnologies actuals disponibles de tractaments d'aigües</b> .....	<b>31</b>
6.1 Pretractament.....	31
6.2 Tractament biològic.....	32
6.3 Tractament de fangs .....	34
6.3.1 Gestió dels fangs .....	35
<b>7 Noves propostes de tractaments d'aigua</b> .....	<b>36</b>
7.1 Centralitzat, descentralitzat o híbrid? .....	36
7.2 Aigües residuals d'un habitatge i tipus de separacions .....	38
7.2.1 Tipus d'aigües domèstiques .....	38
7.2.2 Separació d'efluents .....	39
7.2.3 Tipus de WC.....	42

<b>7.3 Tractaments i costos associats .....</b>	<b>45</b>
7.3.1 Etapa 1 i 2: tractament per les aigües negres o marrons .....	46
7.3.2 Tractament per les aigües grogues.....	59
7.3.3 Etapa 3: tractament per les aigües grises + negres .....	65
7.3.4 Etapa 4: Reverse Osmosi (RO) .....	70
7.3.5 Etapa 5: Ultra violeta (UV) .....	71
7.3.6 Tanc d'emmagatzematge .....	72
7.3.7 Canalitzacions i bombaments .....	73
7.3.8 Reaprofitament d'aigües.....	79
<b>8 Optimització de costos.....</b>	<b>83</b>
<b>8.1 Concepte d'optimització i programa gams.....</b>	<b>83</b>
<b>8.2 Identificació i descripció del problema .....</b>	<b>85</b>
<b>8.3 Superestructura i formulació .....</b>	<b>87</b>
8.3.1 Superestructura.....	87
8.3.2 Formulació del problema .....	90
8.3.3 Estudi d'estratègies de solució .....	100
<b>9 Resultat i discussió .....</b>	<b>102</b>
<b>9.1 Resultats.....</b>	<b>102</b>
9.1.1 Distribució i configuracions .....	102
9.1.2 Qualitat de les aigües .....	106
9.1.3 Balanç d'aigua.....	107
9.1.4 Balanç econòmic .....	111
<b>9.2 Discussió.....</b>	<b>118</b>
<b>10 Conclusions.....</b>	<b>122</b>
<b>11 Planificació i pressupost.....</b>	<b>123</b>
<b>11.1 Planificació.....</b>	<b>123</b>
<b>11.2 Pressupost .....</b>	<b>125</b>
<b>12 Bibliografia .....</b>	<b>127</b>

# ÍNDEX DE FIGURES

Figura 1. Representació del sistema lineal de gestió de les aigües residuals.....	2
Figura 2. Representació del sistema circular de gestió de les aigües residuals.....	3
Figura 3. Simplificació de la metodologia del projecte .....	5
Figura 4 Metodologia per la construcció i optimització del model.....	7
Figura 5. Evolució temporal de la concentració de CO <sub>2</sub> .....	8
Figura 6. Diferenciació de la Catalunya Seca i la Catalunya Humida.....	10
Figura 7. Zones climàtiques de Catalunya. Color verd: zona pirinenca, color groc: zona interior, color taronja: zona Litoral i Prelitoral.....	10
Figura 8. Representació de la disminució de precipitacions per cada escenari i ciutat.....	12
Figura 9. Creixement demogràfic de Catalunya.....	14
Figura 10. Gràfic de les projeccions de població amb referència del 2021. ....	15
Figura 11. Mitjana de superfície segons l'habitatge i la regió europea. ....	17
Figura 12. Recompte dels habitatges plurifamiliars i unifamiliars. Groc són habitatges plurifamiliars i taronja són habitatges unifamiliars. ....	18
Figura 13. Recompte dels habitatges plurifamiliars i unifamiliars. Groc són habitatges plurifamiliars i taronja són habitatges unifamiliars. ....	18
Figura 14. Projecció de nombre de llars i habitants per llar. ....	20
Figura 15. Projeccions de les llars segons nombre d'habitants. ....	20
Figura 16. Percentatges de demanda d'aigua. ....	23
Figura 17. Evolució de la demanda d'aigua domèstica a Catalunya. ....	23
Figura 18. Recorregut de les aigües tractades per l'ETAP de Montfullà. ....	25
Figura 19. Recorregut per les aigües tractades pel consum de Tarragona.....	26
Figura 20. Nombre de categories d'aigües protegides pel consum humà.....	26
Figura 21. Representació gràfica del risc químic a l'esquerra i quantitatiu a la dreta de les masses d'aigua per consum humà.....	27
Figura 22. Gràfica del consum i disponibilitat de l'aigua segons els diferents escenaris futurs per Girona.....	29
Figura 23. Gràfica del consum i disponibilitat de l'aigua segons els diferents escenaris futurs per Tarragona.....	30
Figura 25. Relació del grau de descentralització dels habitatges i els punt de tractament de les aigües residuals.....	37
Figura 26. Esquema dels diferents tipus d'aigües residuals d'un habitatge. ....	38
Figura 27. Percentatge de nutrients en massa i volum segons l'origen de les aigües residuals.....	40
Figura 28. Configuració proposada pel tractament d'aigües negres o marrons.....	46
Figura 29. Configuració pel tractament d'aigües grogues.....	59
Figura 30. Esquema de MABR amb control de pH de cel·la electroquímica.....	63
Figura 31. Configuració proposada pel tractament de l'etapa 3.....	65
Figura 32. Configuració proposada pel tractament de l'etapa 4.....	70
Figura 33. Configuració proposada pel tractament final de les aigües per consum no potable.....	71
Figura 34. Configuració proposada pel tractament d'aigües de pluja.....	80
Figura 35. Esquema descriptiu dels diferents casos a optimitzar.....	86
Figura 36. Esquema de la superestructura de la gestió dels habitatges plurifamiliars. Els habitatges unifamiliars són anàlegs.....	88
Figura 37. Report de la solució del problema d'optimització.....	101
Figura 38. Configuració de distribució i tractament d'habitatges unifamiliars.....	102
Figura 39. Configuració de distribució i tractament d'habitatges plurifamiliars.....	103
Figura 40. Percentatges dels diferents costos de la nova gestió per cada tipus d'agrupació d'habitatges pel cas 1.....	113
Figura 41. Preu total de l'aigua per cada ciutat.....	119
Figura 42. Resum de la planificació del treball.....	124

# ÍNDIX DE TAULES

Taula 1. Disminució de la precipitació a l'escenari RCP 4.5 .....	11
Taula 2. Disminució de la precipitació a l'escenari RCP 8.5 .....	11
Taula 3. Prediccions de precipitacions anuals a l'escenari RCP 4.5 .....	13
Taula 4. Prediccions de precipitacions anuals a l'escenari RCP 8.5 .....	13
Taula 5. Prediccions de població seguint l'estudi de l'escenari alt.....	16
Taula 6. Prediccions de població seguint l'estudi de l'escenari alt.....	16
Taula 7. Taula resum de la distribució dels habitatges .....	19
Taula 8. Projecció dels habitants per llar en l'escenari mig .....	21
Taula 9. Projecció dels habitants per llar en l'escenari alt .....	21
Taula 10. Projecció de nombre de distribució d'edificis habitables per Girona.....	22
Taula 11. Projecció de nombre de distribució d'edificis habitables per Tarragona.....	22
Taula 12. Projeccions de demanda d'aigua domèstica segons l'escenari mig/alt i la ciutat .....	24
Taula 13. Disponibilitat segons l'escenari RCP 4.5 o 8.5.....	28
Taula 14. Resum de les diferents càrregues màssiques segons la separació de les aigües.....	41
Taula 15. Taula resum dels preus, funcionament i quantitat d'aigua a utilitzar .....	44
Taula 16. Concentracions dels contaminants segons el tipus d'aigua i inodor utilitzat .....	44
Taula 17. Percentatge d'eliminació al reactor UASB .....	48
Taula 18 Percentatge d'eliminació a l'OLAND .....	53
Taula 19. Percentatges d'eliminació al MABR .....	63
Taula 20. Percentatge d'eliminació de contaminants al MBR .....	66
Taula 21. Percentatge d'eliminació de contaminants del RO .....	70
Taula 22. Precipitació i recollida d'aigua per un habitatge unifamiliar de Girona segons l'escenari 4.5 i 8.5..	81
Taula 23. Precipitació i recollida d'aigua per un habitatge plurifamiliar de Girona segons l'escenari 4.5 i 8.5	81
Taula 24. Precipitació i recollida d'aigua per un habitatge unifamiliar de Tarragona segons l'escenari 4.5 i 8.5 .....	81
Taula 25. Precipitació i recollida d'aigua per un habitatge plurifamiliar de Tarragona segons l'escenari 4.5 i 8.5 .....	82
Taula 26. Tipus de problemes segons les equacions i variables enteres.....	84
Taula 27. Compendi de tipus de distribució per cada etapa de tractament.....	93
Taula 28. Explicació de les nomenclatures descrites a l'etapa 1.a pel DQO.....	95
Taula 29. Explicació de les nomenclatures descrites a l'etapa 1.a pel DQO.....	97
Taula 30. Resum del nombre de zones de tractament per cada cas per la ciutat de Girona en l'escenari mig .....	104
Taula 31. Resum del nombre de zones de tractament per cada cas per la ciutat de Girona en l'escenari alt .....	105
Taula 32. Resum del nombre de zones de tractament per cada cas per la ciutat de Tarragona en l'escenari mig .....	105
Taula 33. Resum del nombre de zones de tractament per cada cas per la ciutat de Tarragona en l'escenari alt .....	105
Taula 34. Concentració dels efluents resultant de cada gestió d'aigües residuals.....	106
Taula 35. Comparació de les demandes d'aigua i disponibilitat de la ciutat de Girona en escenari mig .....	107
Taula 36. Comparació de les demandes d'aigua i disponibilitat de la ciutat de Girona en escenari alt .....	108
Taula 37. Comparació de les demandes d'aigua i disponibilitat de la ciutat de Tarragona en l'escenari mig .....	108
Taula 38. Comparació de les demandes d'aigua i disponibilitat de la ciutat de Tarragona en l'escenari alt .....	108
Taula 39. Comparativa de les demandes d'aigua per cada ciutat .....	109
Taula 40. Resum dels costos per la nova gestió proposada per la ciutat de Girona en l'escenari mig.....	111
Taula 41. Resum dels costos per la nova gestió proposada per la ciutat de Girona en escenari alt .....	112
Taula 42. Resum des costos totals del cas 1 .....	112
Taula 43. Resum dels costos de Capex i Opex segons els tipus d'habitatges.....	114
Taula 44. Resum dels costos per la nova gestió proposada per la ciutat de Tarragona .....	115
Taula 45. Resum dels beneficis per cada cas per la ciutat de Girona .....	116
Taula 46. Resum dels beneficis per cada cas per la ciutat de Tarragona .....	117
Taula 47. Cost de mà d'obra .....	125
Taula 48. Cost de Software .....	125
Taula 49. Cost total del projecte.....	126

# 1. Introducció

## 1.1 Antecedents

Al llarg dels últims anys el territori de Catalunya, situat a la conca mediterrània, ha experimentat diverses variacions en els patrons de temps. Aquests canvis s'han observat en episodis extrems que han comportat fenòmens d'inundacions, com és el cas del Glòria del 2020, o èpoques de sequeres que desemboquen en incendis, com per exemple el de l'incendi de Cap de Creus a l'estiu del 2021. Tots aquests episodis, a més d'altres fenòmens com l'acidificació dels mars, l'augment de la seva temperatura o l'escassetat d'aigua potable, entre d'altres, són fenòmens que es relacionen amb el canvi climàtic i l'escalfament global que està experimentant la Terra.

L'escalfament global és un problema que es porta arrossegant des de fa dècades i la seva principal causa és l'efecte antropogènic. Aquest efecte es justifica amb l'explicació que, pel creixement de la societat, és necessari el consum de recursos com l'energia, el qual provoca l'emissió de gasos i altres conseqüències perjudicials per a la salut humana i el medi ambient.

A causa de l'escalfament global, les temperatures mitjanes de la terra i del mar a la conca mediterrània s'han incrementat en 1.5 °C des de l'època preindustrial. Es preveu que en els escenaris on perdurin les emissions d'altres concentracions, les temperatures puguin incrementar entre 3,8 i un 6,5 °C fins al 2100. Per evitar aquesta catàstrofe i els seus desastres ambientals associats, es va decidir utilitzar l'instrument polític de l'Acord de París de la CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) de mantenir l'increment de la temperatura global per sota dels 2 °C respecte a l'era preindustrial (RCP 2.6). Malgrat les accions que s'estan duent a terme actualment, es preveu que, a conseqüència del canvi climàtic, el patró de les precipitacions estivals es redueixi entre 10 i un 30%, intensificant, així, l'escassetat de l'aigua (Cramer et al., 2020) . Aquest canvi de patró implicaria una reducció de l'escorrentia, la qualitat de l'aigua, la recàrrega dels aqüífers, la seva salinització, etc.

Addicionalment, en els centres urbans, la demanda d'aigua podria incrementar-se entre un 22 i 74%, mentre que la demanda de reg pugui augmentar entre un 4-18%. Si a això se li



afegeix una creixent industrialització i, per tant, una major demanda d'aigua d'ús industrial, la societat es veuria abocada a patir, en tots els casos, un escenari d'escassetat d'aigua (Cramer et al., 2020).

Per poder fer front a les problemàtiques generades per aquesta escassetat en les zones que es preveuen més afectades, s'estan realitzant estudis de nous mètodes de tractament, gestió i reutilització de l'aigua.

L'objectiu de la gestió de les aigües residuals és establir unes mesures de protecció cap al medi ambient, tenint en compte l'afectació que té sobre l'economia i la societat (Metcalf & Eddy, 2014).

## 1.2 Objectiu

L'objectiu principal del treball és conèixer les prediccions de disponibilitat d'aigua en el 2030 i el 2050 en un dels llocs de la conca mediterrània. L'estudi està basat en les característiques de la ciutat de Girona i de Tarragona, on s'estudia la viabilitat tècnico-econòmica d'incorporar un sistema híbrid per a gestionar les aigües domèstiques i saber si aquesta nova gestió permet satisfer el consum futur.

Es proposa una gestió que permeti passar d'un sistema lineal de gestió de l'aigua domèstica a un sistema circular on es puguin reaprofitar aquells nutrients i recursos que en un futur escassejaran, com és el cas del fòsfor o la reutilització de les aigües tractades.

Finalment, per poder fer l'estudi de la part econòmica es pretén construir un model amb el qual es pugui conèixer l'òptim econòmic dintre de les diferents possibilitats per tractar les aigües domèstiques.

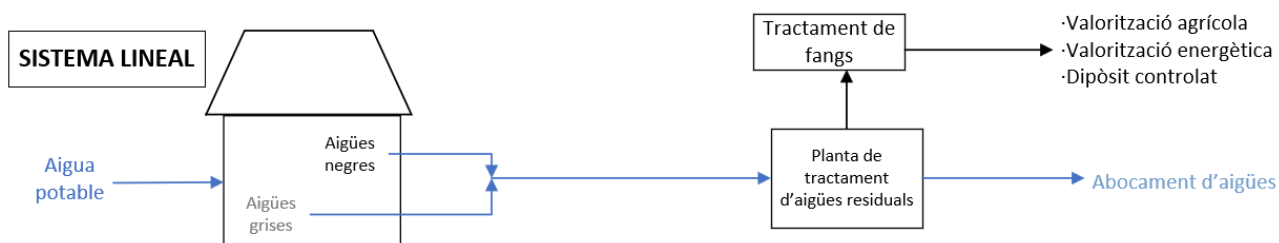


Figura 1. Representació del sistema lineal de gestió de les aigües residuals

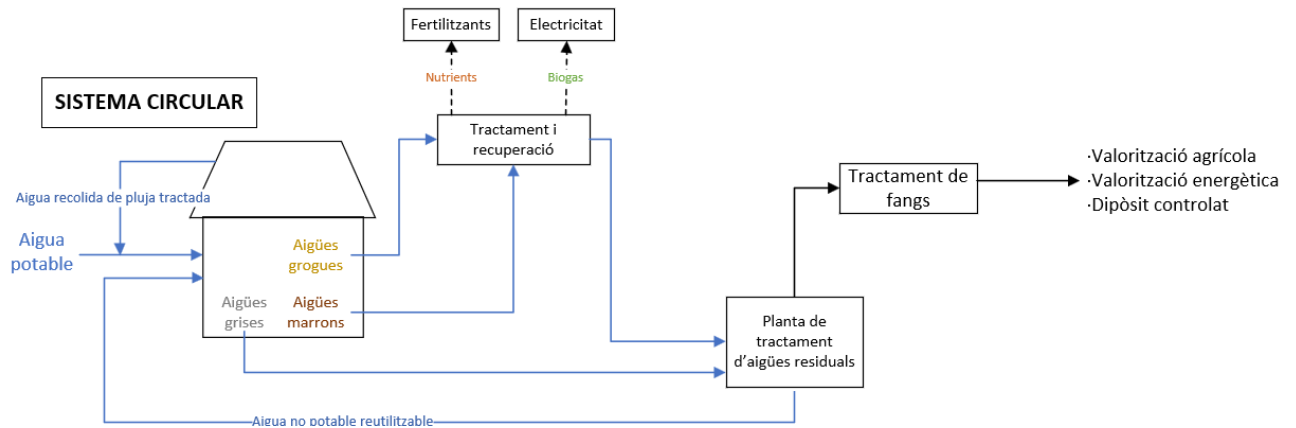


Figura 2. Representació del sistema circular de gestió de les aigües residuals

## 1.3 Abast

Per poder fer aquest estudi de futur és necessari conèixer la disponibilitat d'aigua que hi haurà en el 2030 i el 2050 a la conca mediterrània, en concret a les ciutats de Girona i de Tarragona. També, cal considerar l'augment de la demanda que està associat a l'increment demogràfic, i observar els canvis en els patrons de pluja que s'esperen pel 2030 i el 2050. Per altra banda, es fa una recerca dels nous elements que es poden utilitzar per fer un bon tractament d'aigües, canviant els mètodes convencionals per uns que siguin més eficients i ajudin a poder reutilitzar l'aigua tractada per a usos domèstics.

Un cop es coneguin les prediccions de futur, es durà a terme el disseny de gestions d'aigües i es buscarà, mitjançant un model d'optimització, el sistema híbrid que es consideri més econòmic per poder incorporar al cas de Girona i Tarragona.

## 2 Metodologia

En aquest treball s'ha establert una proposta de model de gestió dels possibles tractaments i abastament d'aigües que es podrien aplicar en horitzons futurs.

En primer lloc, s'ha estudiat quins són els patrons de pluja actuals en cada zona d'estudi (Girona i Tarragona) i s'ha observat la diferència climàtica entre l'actualitat i un futur situat als anys 2030 i 2050. Paral·lelament, s'ha analitzat la distribució de la població actual i la tipologia de les construccions (habitatges unifamiliars i blocs d'habitatges). Amb les dades actuals de consum i demografia, i les projeccions futures (del 2030 i 2050) s'ha calculat la disponibilitat d'aigua en els dos futurs proposats.

Un cop feta la recerca de dades, s'han delimitat i construït el que seran els escenaris d'estudi per a cada població.

S'han estudiat els tractaments d'aigües residuals convencionals i s'ha proposat un model híbrid de tractament amb diferents combinacions. S'han calculat els costos que impliquen aquestes adaptacions i s'han optimitzat per conèixer quina seria la configuració òptima des d'un punt de vista econòmic.

A continuació s'adjunta una imatge per entendre els passos seguits en aquest treball.

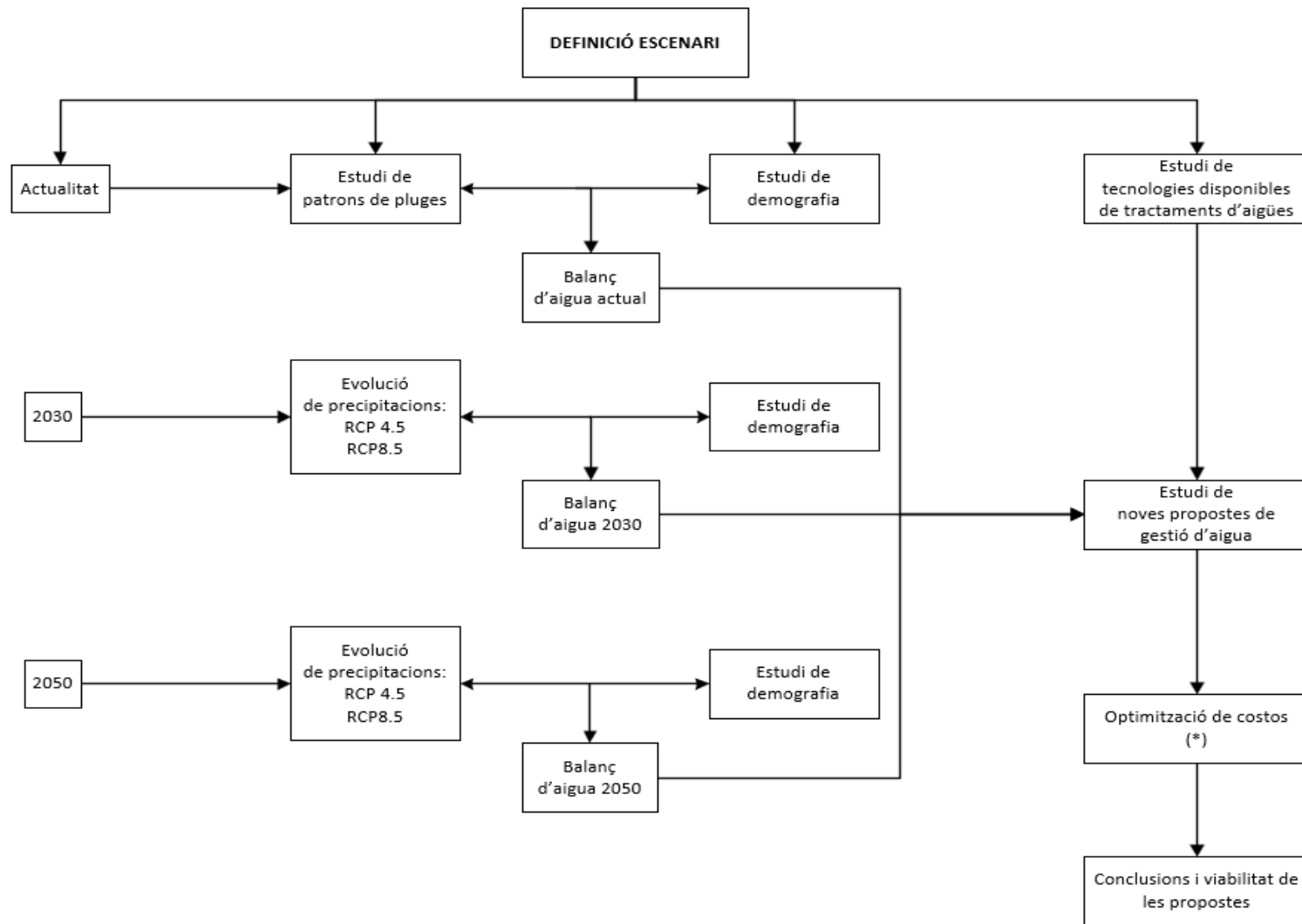


Figura 3. Simplificació de la metodologia del projecte

Pel que fa a l'apartat d'optimització de costos(\*):

S'ha utilitzat el software computacional GAMS (General Algebraic Modeling Sstem) que és un software d'alt nivell que serveix per al modelatge de sistemes per obtenir una optimització matemàtica, està dissenyat per resoldre models lineals, no lineals, i mixtes (GAMS).

Pel que fa a les característiques i els paràmetres de composició s'han fet servir diferents programacions en Excel, com serien per exemple:

- Càlcul de la demanda d'aigua en cada escenari futur.
- Càlcul de la disponibilitat d'aigua en cada escenari futur.
- El càlcul de canonades respecte a la distribució de la població (càlculs s'ha de calcular prèviament de fer l'optimització amb Gams).
- Càlcul dels diferents tipus de concentració a l'efluent de sortida de cada tractament.
- Càlcul de la quantitat d'aigua recollida de pluja
- Càlcul de quantitat reaprofitada com a aigua no potable i potable

Un cop construït el model, es pot resoldre el sistema d'optimització per cada escenari i valorar si amb els aspectes econòmics s'aconsegueix assolir els objectius necessaris.

Per tant, la finalitat d'aquest segon punt és definir un model matemàtic que tingui en compte les noves tecnologies i les diferents distribucions d'habitatges per a la gestió de les aigües residuals. A la Figura 4 es mostren els passos seguits en l'apartat d'optimització.

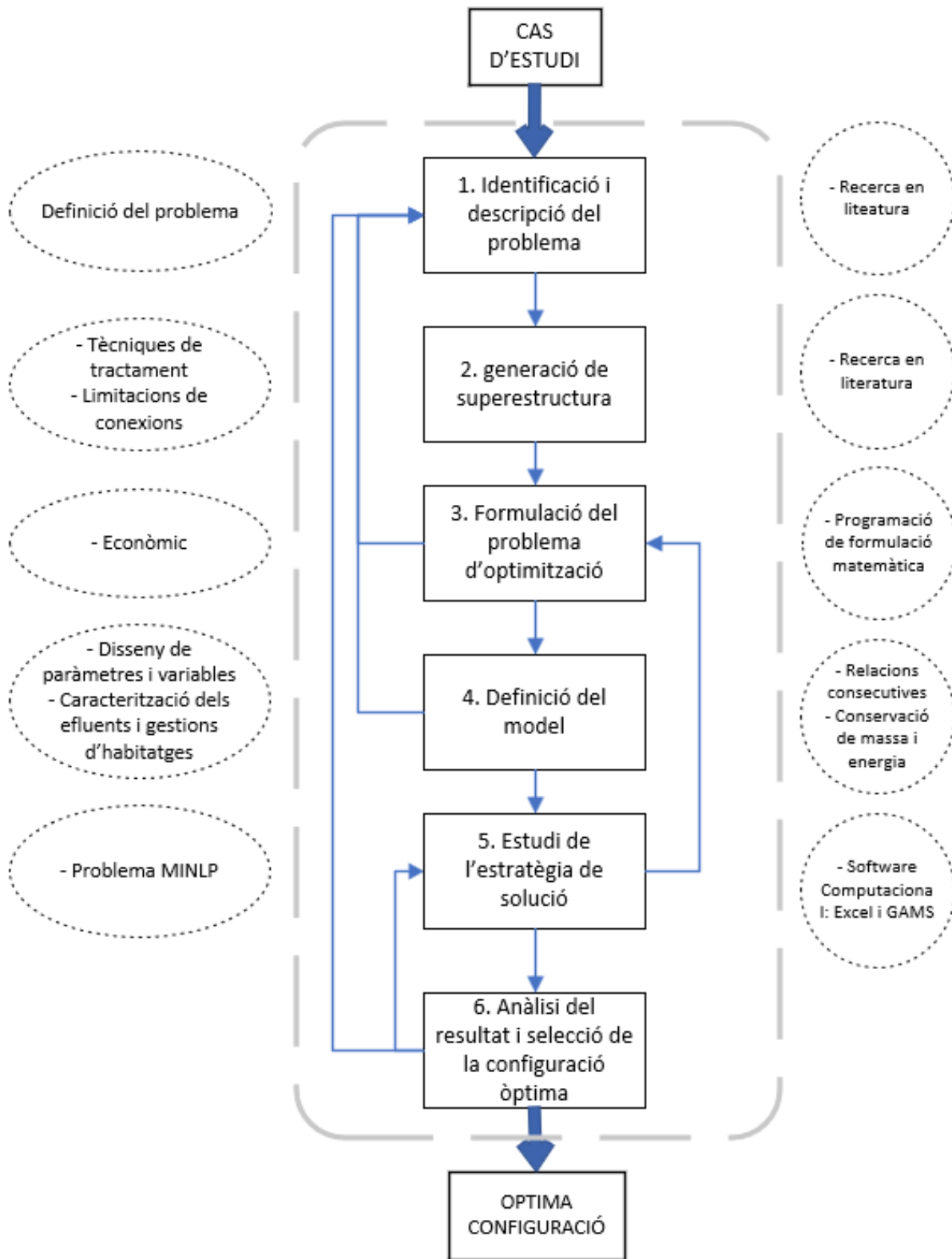


Figura 4 Metodologia per la construcció i optimització del model segons (Padrón-Páez et al., 2020)

### 3 Variació de patrons de pluja

En aquest apartat s'explica la variació de les precipitacions al 2030 i 2050 respecte a l'actualitat a Girona i Tarragona.

#### 3.1 Possibles escenaris de futur

Previ a la realització dels càlculs de les previsions de precipitacions cal fer esment als futurs escenaris de previsió que s'aplicaran i que estan prèviament definits per l'Altava-Ortiz & Barrera-Escoda (2020).

Catalunya es caracteritza per tenir un clima mediterrani i com a tal, es considera com un punt crític (Cramer et al., 2018; Gleick, 2014; Lionello & Scarascia, 2018). Un punt crític del canvi climàtic es defineix com un clima sensible al canvi global (Giorgi, 2006).

En l'actualitat es poden trobar diferents tipus d'escenaris de projeccions de futur per quantificar els impactes ocasionats per l'activitat humana. Aquest treball, en concret, s'ha basat en els escenaris que engloben el CMIP5, ja que són els utilitzats per l' Altava-Ortiz & Barrera-Escoda (2020), i perquè tenen una bona simulació en les característiques principals de la circulació general a la zona de l'Atlàntic Nord o Europa en particular (van Vuuren et al., 2011).

Per aquest motiu, s'observa l'evolució de la concentració del CO<sub>2</sub> al llarg del període 1990-2100 dels escenaris RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5.

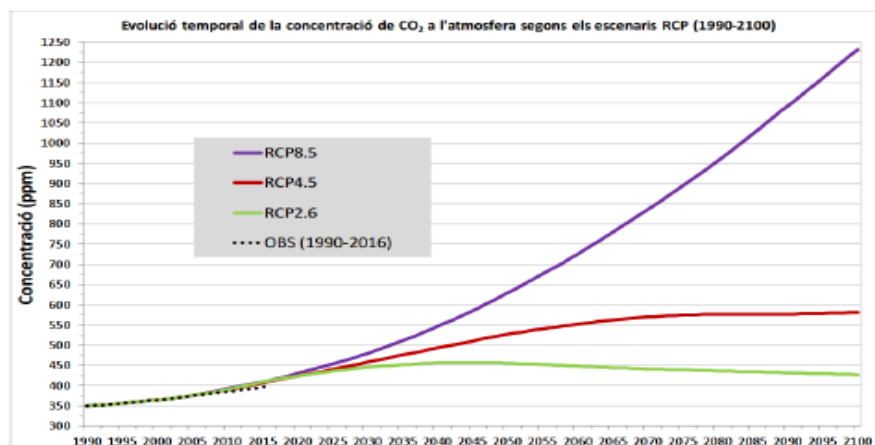


Figura 5. Evolució temporal de la concentració de CO<sub>2</sub>. Font: (Altava-Ortiz & Barrera-Escoda, 2020)

Per entendre millor la Figura 5 i els escenaris que es contemplen, a continuació s'explica quins escenaris es tenen en compte i per què, ja que tots ells es basen en protocols elaborats prèviament.

L'escenari RCP 8.5, fa referència a un futur on no hi ha cap control de la dispersió de contaminants i es tracta del cas més extrem, és a dir, del futur menys optimista pel que fa als gasos d'emissions d'efecte hivernacle. En aquest cas, s'espera un increment global de temperatura de 3,7 °C a principis del 2100 respecte a l'era preindustrial.

RCP 4.5, en aquesta situació s'espera un increment de temperatura global de 1,8 °C a principis del 2100 respecte a l'era preindustrial.

L'escenari RCP 2.6 assumeix que les emissions antropogèniques seran negatives en el 2070 i, per tant, que l'increment de temperatura global serà d'un 1 °C al 2100 respecte a l'era preindustrial. Tanmateix, cal aclarir que aquest escenari no es té en compte, ja que no es contempla que es pugui assolir aquest objectiu.

## **3.2 Comportament de la precipitació a Catalunya**

Catalunya té una orografia variable i, per aquest motiu, es poden diferenciar dues grans zones de precipitacions. Tenint en compte aquest fet, es duu a terme l'estudi en dues localitzacions diferents.

La primera localització és Girona, una ciutat situada a una zona que es considera part de la Catalunya humida (Turon Florenza et al., 2021). Té una alta densitat de població i es tracta d'una ciutat petita amb pisos de baixes alçades i una gran dominància en urbanitzacions de cases ubicades relativament a prop al nucli urbà.

La segona localització és la ciutat de Tarragona, que se situa a la zona de la Catalunya seca (Turon Florenza et al., 2021), i té una major densitat de població que Girona. El fet de trobar-se a la costa repercuteix en la disponibilitat de l'aigua i de les gestions de les aigües domèstiques. A diferència de Girona, els edificis que predominen són els pisos d'altres alçades i pocs habitatges tipus cases.



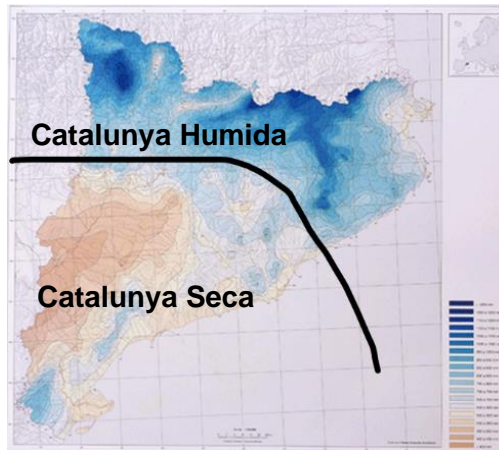


Figura 6. Diferenciació de la Catalunya Seca i la Catalunya Humida

## **CANVIS PATRONS DE PLUJA**

La temperatura mitjana a Catalunya és 1.6<sup>o</sup> C més elevada que la de les temperatures de mitjans del segle XX. Aquest increment de temperatura té un factor associat a una disminució de les precipitacions (un ritme de -1.4 % per decenni respecte als mitjans del segle XX) (Altava-Ortiz & Barrera-Escoda, 2020).

A Catalunya, les sèries climàtiques de precipitació se separen en 3 zones: la zona Pirinenca, la zona Interior i la zona Litoral i Prelitoral com es pot observar a Figura 7.



Figura 7. Zones climàtiques de Catalunya. Color verd: zona pirinenca, color groc: zona interior, color taronja: zona Litoral i Prelitoral. Font: Altava-Ortiz & Barrera-Escoda (2020)

En aquest cas, es va estudiar la zona Litoral i Prelitoral, on es troben les ciutats de Girona i Tarragona.

Un cop escollits els escenaris que s'expliquen en l'apartat 3.1, s'utilitzen les dades de predicció calculades en l'Estratègia CATalana d'adaptació al canvi climàtic (ESCAT, d'ara endavant) on té en compte els escenaris del CMIP5 (Altava-Ortiz & Barrera-Escoda, 2020).

La reducció de precipitacions estimada es pot observar en la següent taula:

Taula 1. Disminució de la precipitació a l'escenari RCP 4.5

RCP 4.5			
2030		2050	
DISMINUCIÓ PRECIPITACIÓ		DISMINUCIÓ PRECIPITACIÓ	
HIVERN	4,5%	HIVERN	5,4%
PRIMAVERA	-8,6%	PRIMAVERA	2,8%
ESTIU	8,3%	ESTIU	18,7%
TARDOR	9,7%	TARDOR	5,7%

Taula 2. Disminució de la precipitació a l'escenari RCP 8.5

RCP 8.5			
2030		2050	
DISMINUCIÓ PRECIPITACIÓ		DISMINUCIÓ PRECIPITACIÓ	
HIVERN	8,2%	HIVERN	3,9%
PRIMAVERA	-0,9%	PRIMAVERA	2,1%
ESTIU	15,6%	ESTIU	25,8%
TARDOR	10,2%	TARDOR	12,4%

Cal esmentar que les anteriors reduccions són valors amitjanats respecte de les prediccions compreses entre els anys 1971-2000 fins al 2030 i 2050. Les prediccions són vàlides per a la globalitat de la conca de Catalunya, ja que no hi havia estudis més específics per a ciutats o localitzacions. Per aquest motiu, aquesta reducció de precipitacions és global.

Aplicant aquestes disminucions a les precipitacions de cada territori es van obtenir els següents resultats, que es mostren a la Figura 8, per a cada territori segons l'escenari RCP 4.5 o RCP 8.5. Les dades i càlculs numèrics es troben desglossats a l'annex.

Variació de patrons de pluja

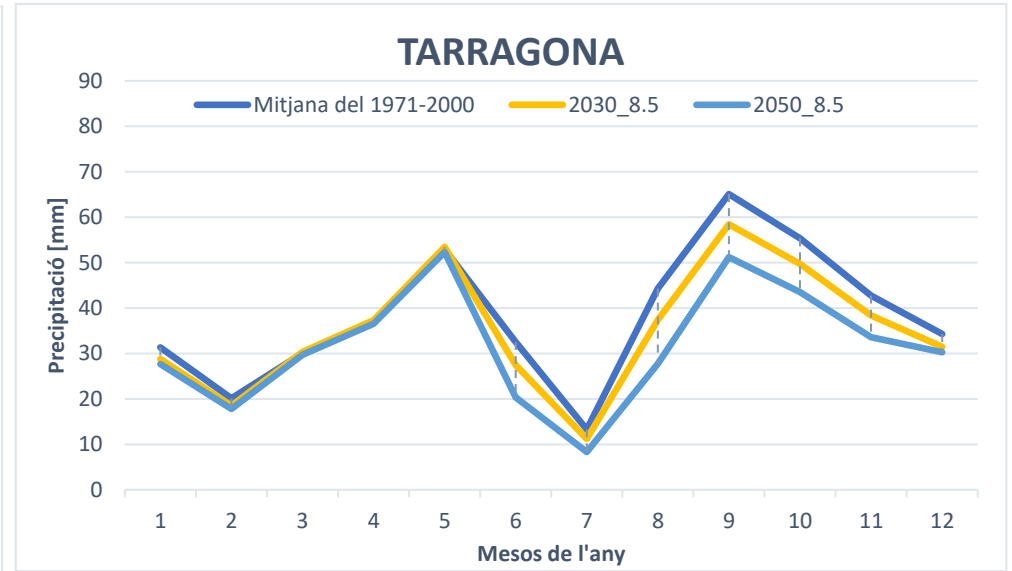
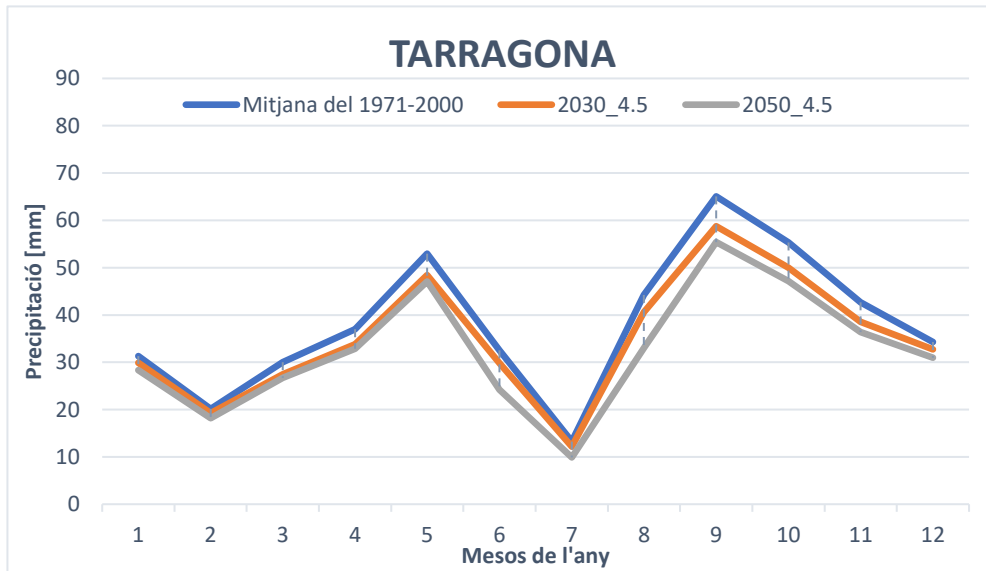
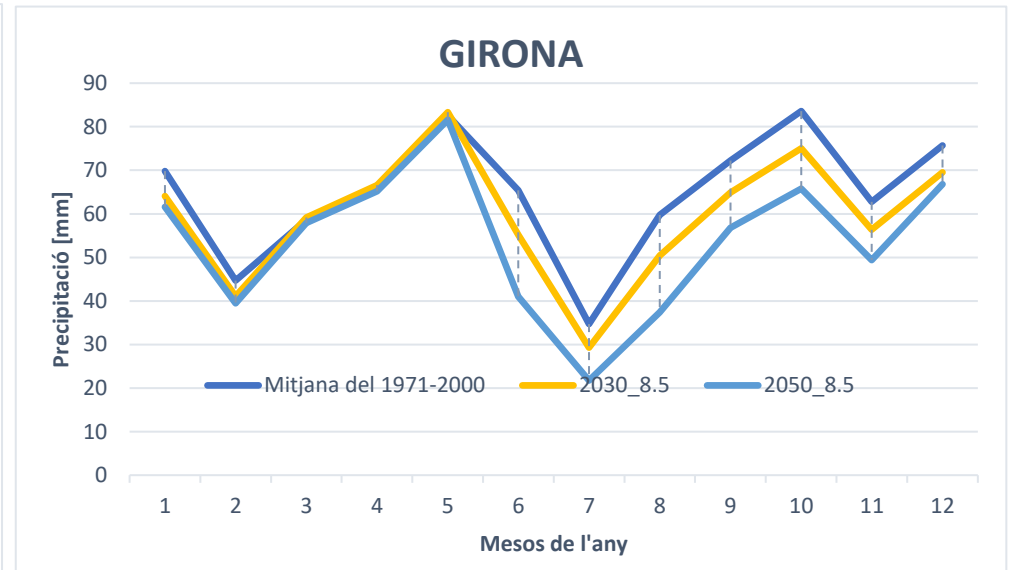
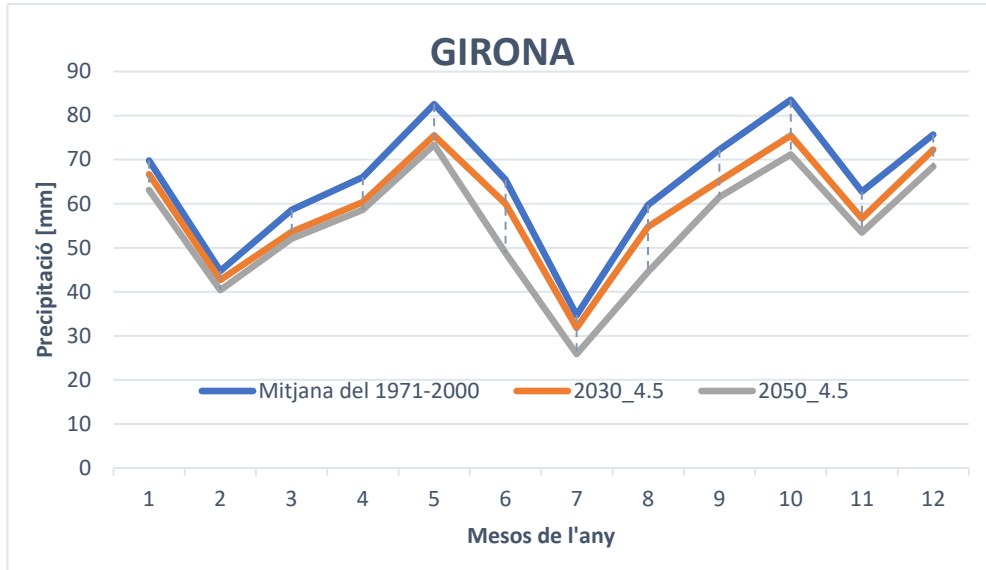


Figura 8. Representació de la disminució de precipitacions per cada escenari i ciutat

Segons les dades observades i els càlculs realitzats, es pot contrastar les observacions de Turon Florenza et al. (2021), al Mediterrani hi ha una precipitació del voltant dels 500-600 mm anuals, i en les zones gironines es poden arribar als 650-700 mm.

Precipitacions anuals i prediccions d'escenari RCP 4.5:

Taula 3. Prediccions de precipitacions anuals a l'escenari RCP 4.5

	<b>GIRONA</b>	<b>TARRAGONA</b>
<b>any</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>
<b>1971-2000</b>	775,91	458,88
<b>2030</b>	750,70	442,05
<b>2050</b>	695,93	410,15

Precipitacions anuals i prediccions d'escenari RCP 8.5:

Taula 4. Prediccions de precipitacions anuals a l'escenari RCP 8.5

	<b>GIRONA</b>	<b>TARRAGONA</b>
<b>any</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>
<b>1971-2000</b>	775,91	458,88
<b>2030</b>	714,94	422,25
<b>2050</b>	644,59	378,87

Aquestes dades s'utilitzaran per càlculs sobre la recollida d'aigua de pluja de l'apartat 7.3.8 i la disminució de la disponibilitat d'aigua potable de l'apartat 5.2.

## 4 Projecció de demografia i distribució

En aquest apartat s'explica l'evolució demogràfica prevista i la distribució dels habitatges i habitants de cada ciutat, ja que són dades que influeixen a l'hora de construir els diferents escenaris futurs.

### 4.1 Creixement de població

A continuació, com es pot observar en la Figura 3 la demografia de Catalunya l'any 2005 va començar a tenir un creixement positiu amb una alta taxa, es pot observar que el creixement encara continua. Per aquest motiu, és necessari conèixer la població que es preveu en el 2030 i 2050, ja que són dades importants per saber la pressió de demanda d'aigua que es tindrà per abastir a tota la població (IDESCAT, 2022b). Cal esmentar, que la província de Barcelona és la que més influeix en el creixement demogràfic global.

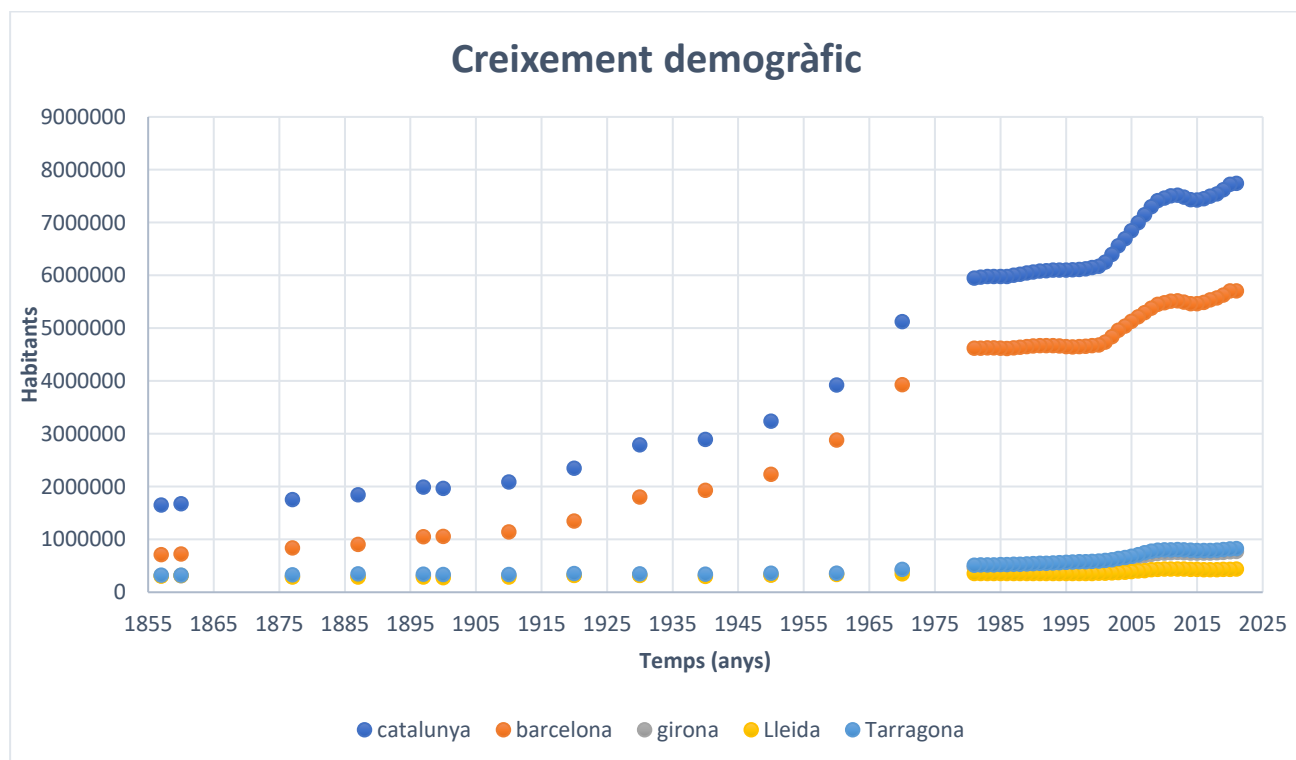


Figura 9. Creixement demogràfic de Catalunya. Font: IDESCAT

A causa d'aquest creixement, s'ha volgut fer un estudi basant-se en altres estudis de (IDESCAT, 2022a) on s'observa que s'han fet tres tipus de projeccions de població. Aquest treball se centra en els escenaris més “desfavorables”, que serien l'augment de la demografia en un escenari de creixement mitjà i alt.

**Població projectada a 1 de gener per escenari (base 2021). Catalunya. 2021-2071**

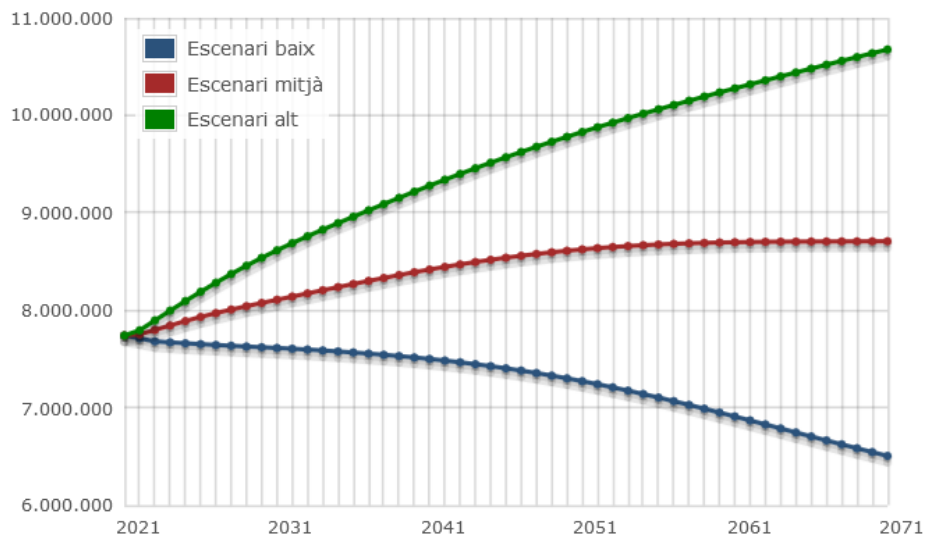


Figura 10. Gràfic de les projeccions de població amb referència del 2021. Font: (IDESCAT, 2022a)

Aquest estudi de l'Institut D'Estadística de CATalunya (IDESCAT, d'ara endavant) se centra en el creixement de la població de tota la comunitat autònoma de Catalunya. S'ha decidit interpretar que el creixement de Girona i Tarragona serà proporcional al creixement que s'ha estudiat per tot Catalunya, aquesta assumpció es fa perquè és el que s'ha observat en els darrers anys. Els pertinents càlculs per fer l'assumpció es poden trobar als Annexos.

Fent aquesta assumpció, i coneixent la població del 2021 (any referent de l'estudi elaborat per l'(IDESCAT, 2022a)), s'han obtingut els següents resultats:

## Prediccions de l'escenari alt

Taula 5. Prediccions de població seguint l'estudi de l'escenari alt

DEMOGRAFIA GIRONA			DEMOGRAFIA TARRAGONA		
Any	Habitants	Increment respecte 2021	Any	Habitants	Increment respecte 2021
2021	101932	-	2021	135436	-
2030	112426	10,29%	2030	149379	10,29%
2050	128777	26,34%	2050	171104	26,34%

## Prediccions de l'escenari mitjà

Taula 6. Prediccions de població seguint l'estudi de l'escenari alt

DEMOGRAFIA GIRONA			DEMOGRAFIA TARRAGONA		
Any	Habitants	Increment respecte 2021	Any	Habitants	Increment respecte 2021
2021	101932	-	2021	135436	-
2030	106325	4,31%	2030	141273	4,31%
2050	113379	11,23%	2050	150645	11,23%

## 4.2 Descripció d'habitatges

Aquest estudi és important i necessari per conèixer la superfície útil de cada habitatge i, d'aquesta manera, poder calcular el volum d'aigua de pluja que es pot captar en els escenaris futurs.

Per fer aquesta investigació s'han estudiat les dues ciutats per separat, agafant de referència les dades elaborades per l'IDESCAT, consultant a l'ajuntament de cada població i considerant la informació del cadastre (CATASTRO) entre d'altres.

### 4.2.1 Superfície d'habitatge

D'aquest estudi s'extreu que, per a una localització del sud d'Europa, de mitjana en un edifici tipus casa s'ocupen uns 50 metres quadrats per persona i en un edifici tipus

apartament de bloc de pisos se n'ocupen uns 31 per persona. A causa de la manca d'estudis i d'informació específica d'Espanya o Catalunya, s'han utilitzat aquestes dades de referència sobre la superfície habitable de cada ciutat (Marini et al., 2014).

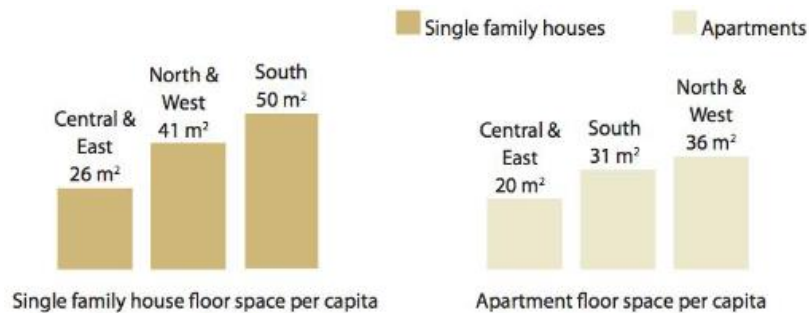


Figura 11. Mitjana de superfície segons l'habitatge i la regió europea. Font: BPIE

## 4.2.2 Distribució d'habitatges

En aquest apartat, s'explica la distribució d'edificis unifamiliars o plurifamiliars i el percentatge respecte el total d'edificis habitables.

### GIRONA

Segons dades aportades per l'Ajuntament, a la ciutat de Girona es van poder comptabilitzar els habitatges unifamiliars (o cases) i els plurifamiliars (o blocs de pisos).

Les dades aportades van verificar que Girona és una ciutat on predominen els habitatges unifamiliars amb un 60% respecte al total d'habitatges totals. Pel que fa als habitatges plurifamiliars, s'ha considerat una alçada de 4 pisos i de 3 portes per a cada planta.

A continuació, a la Figura 12 es mostra el recompte que es va fer dels edificis en algunes zones de la ciutat de Girona.





Figura 12. Recompte dels habitatges plurifamiliars i unifamiliars. Groc són habitatges plurifamiliars i taronja són habitatges unifamiliars. Font: GoogleMaps

## TARRAGONA

Les dades aportades per l'Ajuntament de Tarragona van permetre conèixer el nombre total d'habitatges unifamiliars de la ciutat. Tanmateix, per poder ampliar la informació, es va decidir agafar una petita mostra de la ciutat en el registre cadastre (CATASTRO) i es va fer el recompte dels habitatges unifamiliars i plurifamiliars. D'aquest recompte, es va poder observar que a Tarragona els habitatges plurifamiliars formen part del 85% respecte a la resta dels edificis habitables. També cal fer esment, que en els habitatges plurifamiliars s'ha considerat una alçada de 6 pisos i de 3 portes per cada planta.



Figura 13. Recompte dels habitatges plurifamiliars i unifamiliars. Groc són habitatges plurifamiliars i taronja són habitatges unifamiliars. Font: GoogleMaps

A continuació a la Taula 7 es presenta un resum de les dades que s'utilitzaran en l'estudi de projeccions d'habitatges.

Taula 7. Taula resum de la distribució dels habitatges

	TARRAGONA	GIRONA
Habitatges unifamiliars	15%	60%
Habitatges plurifamiliars	85%	40%
Habitatges unifamiliars per planta en habitatge plurifamiliar	3	3
Nombre mitjà de plantes per habitatge plurifamiliar	6	4

Malgrat la falta d'informació específica de cada ciutat, per poder fer les projeccions futures es fa una hipòtesi on el nombre de plantes i portes dels habitatges plurifamiliars és constant. Aquesta assumpció es fa perquè a anys vista no es considera que es puguin fer grans modificacions en els edificis, perquè variï respecte a la proporció global dels edificis.

Per altra banda, el percentatge d'edificis unifamiliars i plurifamiliars també es considera constant. Per poder fer aquesta presumpció, s'ha estudiat la superfície total ocupada pels habitatges el 2030/2050, i s'ha comprovat que la hipòtesi no sobrepassa el límit que va estudiar el BPIE sobre Europa (Marini et al., 2014). Els càlculs d'aquesta comprovació es poden trobar a l'annex.

### 4.2.3 Persones per habitatge

La projecció feta sobre la quantitat d'habitants per llar a Catalunya s'ha elaborat a partir de les dades que presenta l' IDESCAT (2021b):

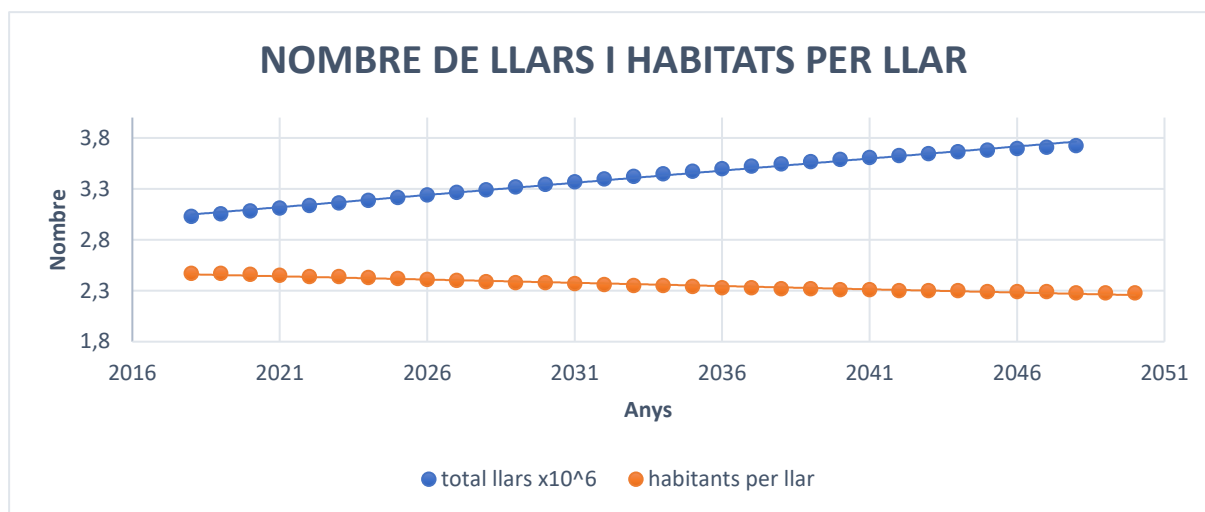


Figura 14. Projecció de nombre de llars i habitants per llar. Font: IDESCAT

Per entendre millor perquè la mitjana global tendeix, a la Figura 15 es mostra una gràfica amb l'estudi de les projeccions de llars segons els habitants que l'ocupen fetes per l'IDESCAT (2021b).

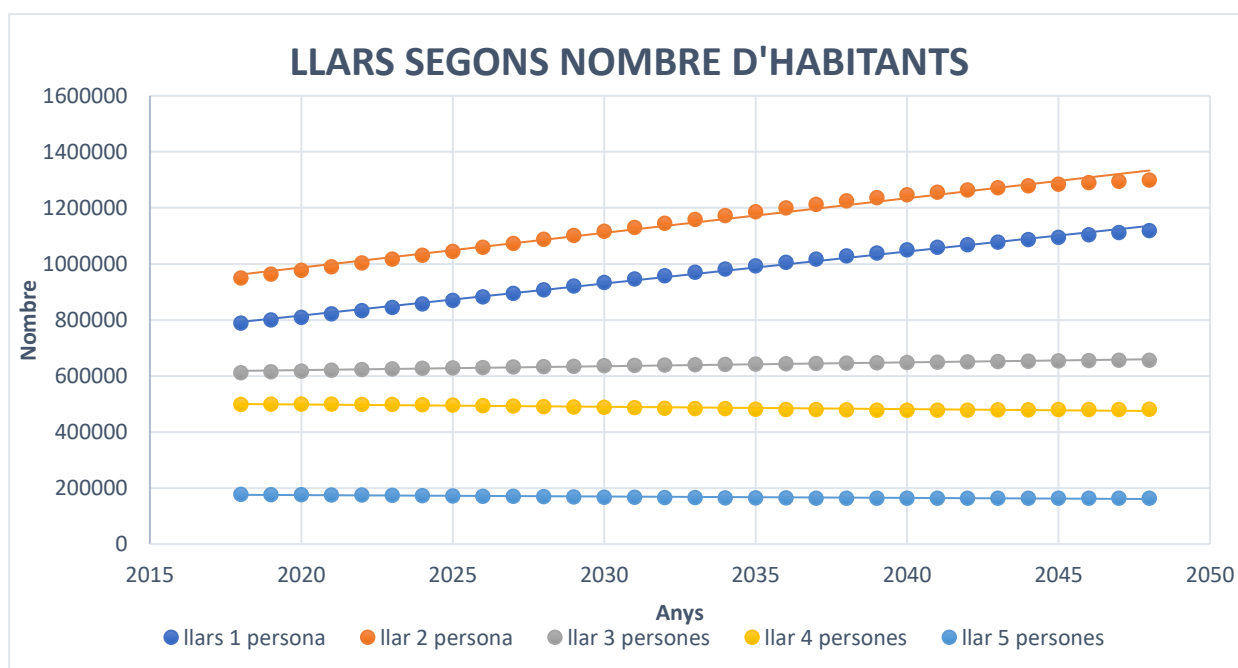


Figura 15. Projeccions de les llars segons nombre d'habitants. Font: IDESCAT

Com es pot observar a la Figura 15, els habitants per llar presenten una lleugera disminució en el temps, fet que explica un increment del nombre de llars total. Pel que fa a la projecció en el temps de les llars de 3, 4 i 5 persones, la variació és menys visible a curt termini.

D'aquestes dades se'n va extreure la dada mitjana d'habitants per un habitatge de cada escenari estudiat per l'IDESCAT (2021a):

Escenari creixement mitjà:

Taula 8. Projecció dels habitants per llar en l'escenari mig

Any	Habitants per llar	Disminució respecte 2021 (%)
2021	2,45	-
2030	2,38	2,86
2050	2,28	6,94

Escenari creixement alt:

Taula 9. Projecció dels habitants per llar en l'escenari alt

Any	Habitants per llar	Disminució respecte 2021 (%)
2021	2,45	-
2030	2,31	5,71
2050	2,11	13,88

Es pot observar que amb el temps els habitats per llar disminueixen mentre que la població global augmenta, i com a conseqüència, creix el nombre de llars.

## 4.3 Projecció 2030 i 2050

A continuació, a la Taula 10 i Taula 11 es mostra el nombre de persones i tipus d'habitatges, segons l'escenari de creixement i any per cada ciutat.

### GIRONA

Taula 10. Projecció de nombre de distribució d'edificis habitables per Girona

	2030		2050	
	ESCENARI MIG	ESCENARI ALT	ESCENARI MIG	ESCENARI ALT
persones	106325	112426	113379	128777
nombre d'habitatges unifamiliars	4915	5197	5911	6714
nombre d'habitatges plurifamiliars	3314	3504	3986	4527
Superfície (km <sup>2</sup> )	9,05	9,57	10,89	12,36

### TARRAGONA

Taula 11. Projecció de nombre de distribució d'edificis habitables per Tarragona

	2030		2050	
	ESCENARI MIG	ESCENARI ALT	ESCENARI MIG	ESCENARI ALT
persones	141273	149379	150645	171104
nombre d'habitatges unifamiliars	594	628	714	741
nombre d'habitatges plurifamiliars	3265	3453	3927	4074
Superfície (km <sup>2</sup> )	7,80	8,25	9,39	9,74

Les dades de les taules Taula 10 i Taula 11 són aproximades i són conseqüència de la hipòtesi que el creixement de la població i edificacions segueixen el mateix patró estudiat el 2021.

## 5 Balanç d'aigua

En aquest apartat s'explica l'estudi que es fa en el balanç d'aigua en un escenari actual i escenaris de futur segons el consum i la disponibilitat del consum domèstic.

A Catalunya el 50% del territori català constitueix el districte de Conca Fluvial de Catalunya, però aquest territori conté el 92,3% de la població resident (A.C.A., 2022).

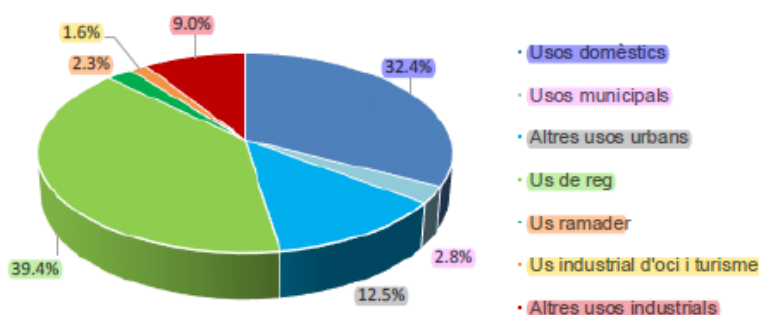


Figura 16. Percentatges de demanda d'aigua. Font: A.C.A., 2022

Com es pot observar en la Figura 16, el consum per només usos domèstics és el segon sector que afecta més a la demanda d'aigua.

### 5.1 Consum domèstic

El consum d'aigua domèstica en els darrers anys s'ha anat estabilitzant i disminuint respecte els anys anteriors com es pot observar en la Figura 17.

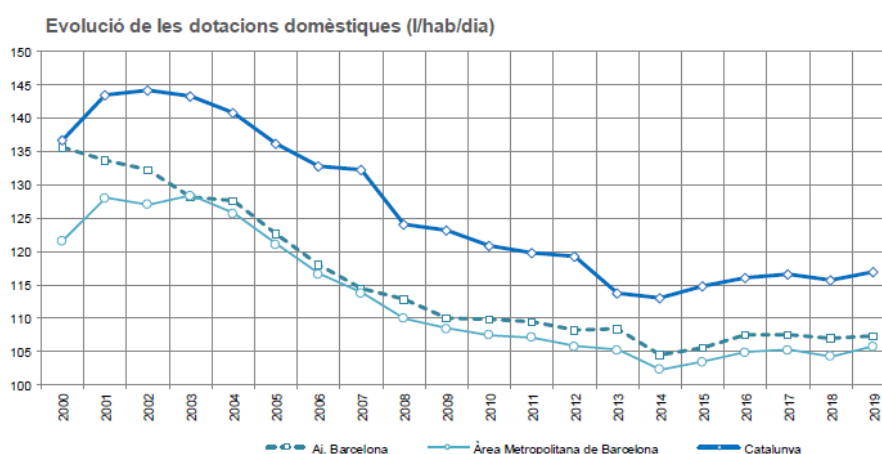


Figura 17. Evolució de la demanda d'aigua domèstica a Catalunya. Font: A.C.A., 2022

S'han trobat dades de consums actuals i passats, però no s'han trobat uns estudis específics de la projecció de la variació del consum d'aigua domèstica. Per aquest motiu, es prendran les últimes dades actualitzades com a referència de consum actual i posterior.

Girona: Segons les dades aportades per l'ACA el 2020, el consum actual d'aigua domèstica és de 117,13 litres per persona i dia. Per tant, el consum domèstic anual a Girona el 2021 va estar de 4,36 hm<sup>3</sup>.

Tarragona: Segons les dades aportades per l'ACA el 2020, el consum actual d'aigua domèstica és 120,09 litres per persona i dia. Com a resultat, el consum domèstic anual a Tarragona el 2021 va ser de 5,94 hm<sup>3</sup>.

Utilitzant els consums del 2020 com a referència i coneixent les dades per l'IDESCAT amb relació a les projeccions de població, es pot arribar a extrapolar el consum d'aigua domèstica en el futur del 2030 i 2050 per cada escenari de creixement:

Taula 12. Projeccions de demanda d'aigua domèstica segons l'escenari mig/alt i la ciutat

	GIRONA		TARRAGONA	
	Any	hm <sup>3</sup> /a	Any	hm <sup>3</sup> /a
ESCENARI MIG	2021	4,36	2021	5,94
	2030	4,55	2030	6,19
	2050	4,85	2050	6,60
	GIRONA		TARRAGONA	
	Any	hm <sup>3</sup> /a	Any	hm <sup>3</sup> /a
ESCENARI ALT	2021	4,36	2021	5,94
	2030	4,81	2030	6,55
	2050	4,90	2050	7,50

## 5.2 Disponibilitat

A continuació, es procedeix a explicar l'origen d'on provenen les aigües pel consum de cada ciutat, i l'estimació de la disponibilitat d'aigua que es troba a Catalunya i a cada ciutat corresponent

Girona:

A Girona la gestió de subministrament de les aigües per a consum de la població el duu a terme l'empresa Aigües de Girona, Salt i Sarrià de Ter (AGSST, en endavant) a la planta de tractament de Montfullà. Aquesta empresa obté tot els seus recursos hídrics del Pasteral II, és a dir, tot el seu proveïment prové d'aigües superficials i els subministra a Girona, Salt i Sarrià de Ter.

A causa de la sequera del 2008 i de l'amenaça de possible escassetat d'aigua, es van construir 3 pous a la zona del Sitjar (que subministraria uns 230 litres per segon, que equivalen a uns 7,2 hm<sup>3</sup>/any) per si hi havia restriccions en el servei del Pasteral. Aquests pous finalment no es van posar en funcionament, i a hores d'ara no han tingut cap manteniment en els aparells que es van instal·lar. Per tant, utilitzar aquests pous implicaria una nova inversió per renovar-los (A.C.A., 2022; AGSST).



Figura 18. Recorregut de les aigües tractades per l'ETAP de Montfullà. Font: AGSST

Tarragona:

A Tarragona, la potabilització de les aigües per al consum de la població el duu a terme l'Empresa Municipal mixta d'Aigües de Tarragona S.A. (EMATSA) a la potabilitzadora que es troba a l'Ampolla.



L'exploració de les aigües subterrànies es destina al regadiu, ja que la quantitat més gran d'aigua que s'obté per al consum domèstic i industrial prové del transvasament del Consorci d'Aigües de Tarragona (CAT, en endavant).

A causa del canvi climàtic, s'espera una disminució dels recursos hídrics. Tarragona, degut a l'escassetat d'aigua i a la problemàtica que es va trobar en la salinització de les seves aigües subterrànies, ha començat a dur a terme l'aprofitament d'aigües dels usos industrials (fonamentalment l'ús de la refrigeració), aconseguint així un cabal d'aprofitament de 5hm<sup>3</sup>/any destinat als regadius (A.C.A., 2022).

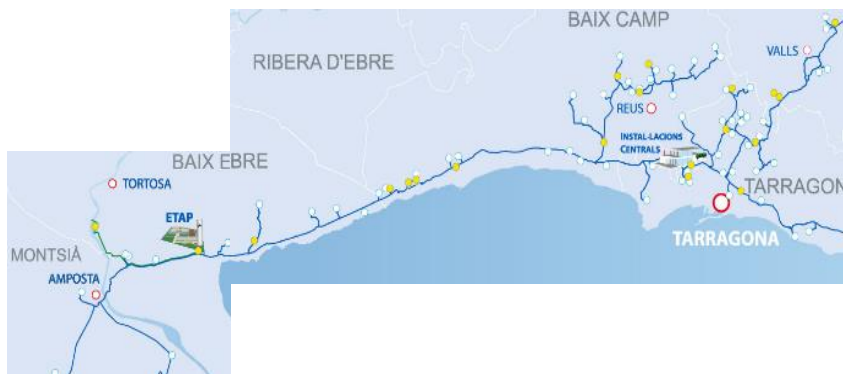


Figura 19. Recorregut per les aigües tractades pel consum de Tarragona. Font: CAT

A grans trets a Catalunya el nombre de masses d'aigua de protecció per consum humà són els següents segons l'(A.C.A., 2022).

Categoria	Protecció per consum humà
Rius	30
Embassaments	6
Estanys	1
Aigües de transició	0
Aigües costaneres	3
Aigües subterrànies	44
<b>Total</b>	<b>84</b>

Figura 20. Nombre de categories d'aigües protegides pel consum humà. Font: A.C.A.

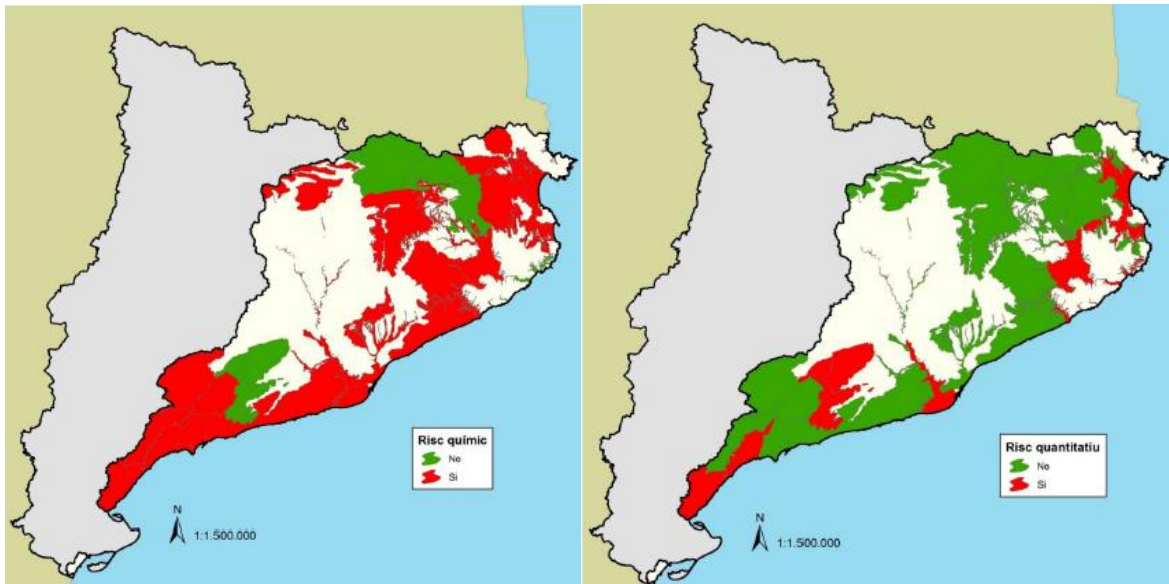


Figura 21. Representació gràfica del risc químic a l'esquerra i quantitatiu a la dreta de les masses d'aigua per consum humà. Font: A.C.A.

Es pot observar que les masses d'aigües pel consum humà que més hi ha són les subterrànies de les quals 31 es troben en risc de no assolir el bon estat químic i d'aquestes, 24 ja s'han valorat en mal estat on presenten un impacte químic comprovat. Per altra banda, es comptabilitzen un total de 13 masses d'aigües subterrànies en risc de no aconseguir el bon estat quantitatiu, i d'aquestes 8 s'han comprovat que es troben en mal estat quantitatiu (imposat per L'ACA). Aquest estudi pot donar a entendre que en els pròxims anys hi ha territoris que no podran dependre de les aigües subterrànies i hauran de buscar maneres de reaprofitar l'aigua que tenen o transportar-la, com és el cas del Transvasament Ter-Llobregat i el CAT.

A causa de la probabilitat de possibles mobilitzacions d'aigua en tot el territori per esmorteir l'escassetat d'aigua, en aquest estudi es procedeix a agafar la totalitat de les aigües superficials de subministrament disponible per consum domèstic segons l'estudi fet per l'A.C.A. (2022), on es va obtenir una dada de 140 litres per persona i dia en el 2020 on es respecta la quantitat d'aigua necessària per a la bona qualitat dels éssers vius que hi viuen. Coneixent les persones que hi ha en el 2020 es pot saber la disponibilitat total en hm<sup>3</sup> a tot Catalunya i així aplicar aquesta dada a cada ciutat respecte a les persones que hi viuen. Seguidament, al saber que la reducció de precipitació influeix directament a les aigües superficials es pot conèixer com es reduirà la disponibilitat d'aigua al llarg dels anys. Aquesta dada de reducció, és la

que es va agafar del (Altava-Ortiz & Barrera-Escoda, 2020) que s'explica a l'apartat Comportament de la precipitació a Catalunya 3.2.

## 5.3 Balanç

Suposant que tant Tarragona com Girona continuen obtenint els seus recursos hídrics a través d'aigües superficials i, per tant, estan exposats directament a les variacions de les pluges explicades a l'apartat 3.2 obtenim el següent resultat, pel que fa a la disponibilitat de l'aigua per usos domèstics:

Taula 13. Disponibilitat segons l'escenari RCP 4.5 o 8.5

ESCENARI	GIRONA		TARRAGONA	
	Any	hm <sup>3</sup> /a	Any	hm <sup>3</sup> /a
4.5	2021	5,21	2021	6,92
	2030	5,07	2030	6,73
	2050	4,93	2050	6,55
ESCENARI	GIRONA		TARRAGONA	
	Any	hm <sup>3</sup> /a	Any	hm <sup>3</sup> /a
8.5	2021	5,21	2021	6,92
	2030	4,92	2030	6,53
	2050	4,72	2050	6,27

A la taula es poden observar dos tipus de colors. El color groc indica que el balanç és negatiu respecte el consum de l'escenari de creixement mig, i el color vermell indica aquells escenaris on el balanç és negatiu, tant a l'escenari de creixement mig com a l'escenari de creixement alt. El càlcul dels consums dels diferents escenaris es troben explicats a l'apartat 5.1.

A continuació a les Figures Figura 22 i Figura 23 es pot analitzar una representació gràfica de la disponibilitat i consum d'aquests punts estudiants.

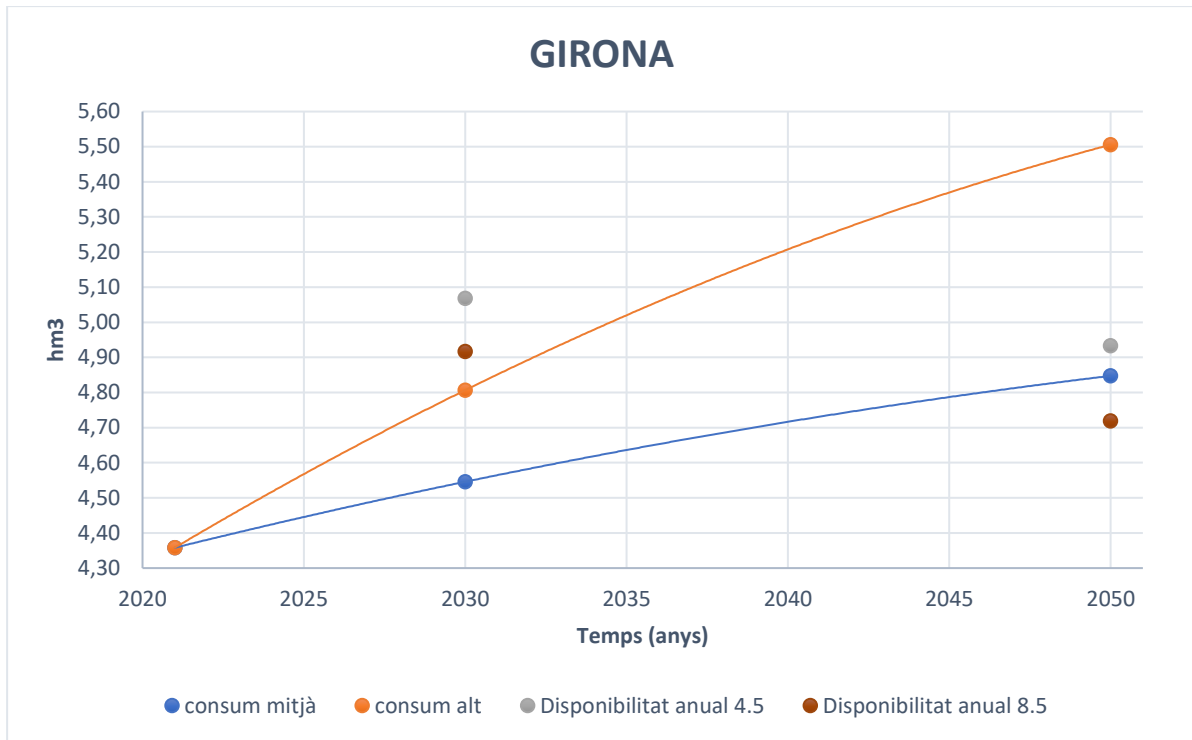


Figura 22. Gràfica del consum i disponibilitat de l'aigua segons els diferents escenaris futurs per Girona

A Girona, s'observa que, seguint la tendència del RCP 4.5 o RCP 8.5, no hi haurà problemes en concepte de balanç d'aigua l'any 2030. Tanmateix, en el 2050, si el nostre escenari de creixement és alt, hi haurà dificultats amb el balanç d'aigua, mentre que el resultat de l'escenari de creixement mitjà mostra un balanç negatiu només si se segueix la tendència de contaminació del RCP 8.5.

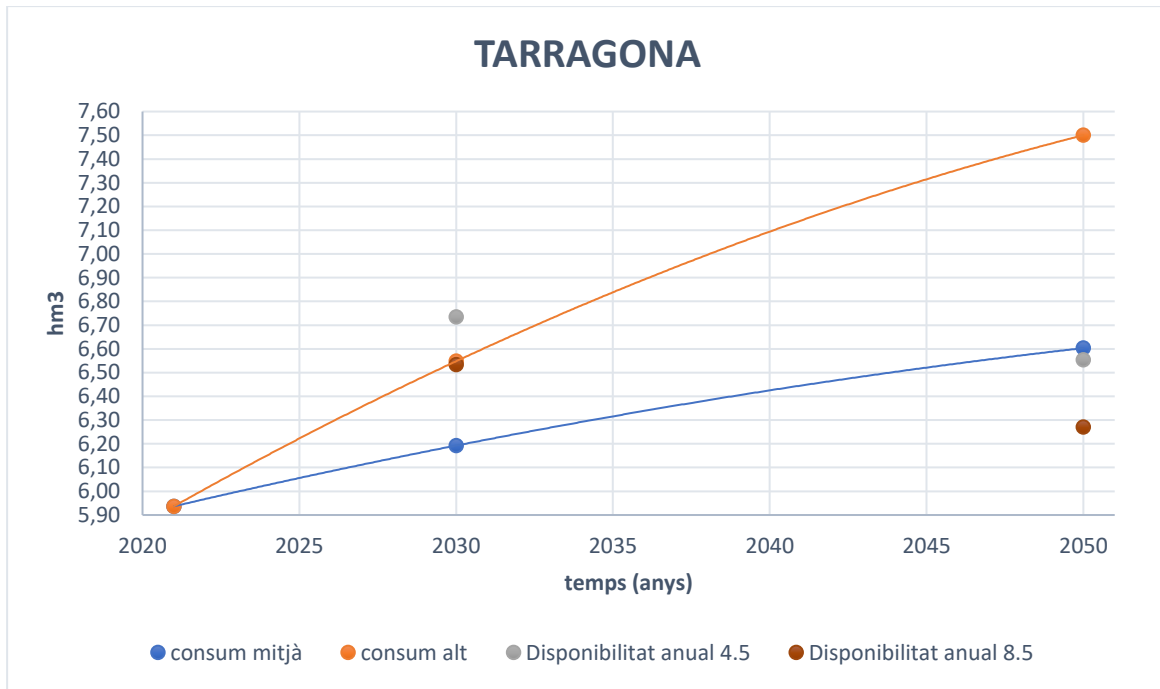


Figura 23. Gràfica del consum i disponibilitat de l'aigua segons els diferents escenaris futurs per Tarragona

A Tarragona s'observa que en el 2030, si l'escenari de creixement és mitjà, el balanç de disponibilitat i consum serà positiu indiferentment del tipus de tendència de contaminació. Mentre que, si l'escenari de creixement és alt i la contaminació segueix la tendència del RCP 4.5, el balanç d'aigua serà positiu. Tanmateix, si segueix la tendència del RCP 8.5, el balanç és negatiu. Per altra banda, seguint la tendència del RCP 4.5 o RCP 8.5, l'any 2050 hi haurà un balanç negatiu d'aigua.

Per aquest motiu, s'estudia cada escenari i es veu si el reaprofitament de l'aigua de la nova gestió pot satisfer la demanda i quina repercussió en té.

## 6 Tecnologies actuals disponibles de tractaments d'aigües

A continuació, s'expliquen els diferents apartats del tractament de les aigües residuals generades amb origen domèstic i com es gestionen els residus ocasionats (fangs). En aquest treball, només es té en compte el tractament d'aigües residuals i es contempla que els residus (fangs) es tracten de manera centralitzada com es fa actualment.

### 6.1 Pretractament

L'objectiu d'aquest tractament és poder separar aquelles matèries que per la seva naturalesa dificulten el tractament i eliminació dels nutrients que provenen de les aigües residuals, igual que poden tenir un efecte abrasiu sobre mecanismes com les bombes i vàlvules.

Predebast: Mitjançant una reixa de desbast, se separen els sòlids de gran mida com fustes, teixits, plàstics, tovalloletes humides, pedres i altres residus que s'escolen pel sistema de clavegueram d'aigües residuals.

Dessorrador: Aquest tractament és el que separa les sorres, sòlids que han traspasat les reixes de desbast, de les aigües residuals i així evitar que aquestes perjudiquin el funcionament de les posteriors instal·lacions (generant abrasions als equipaments). El principi de la seva separació és per diferència de densitat.

Desengreixador: El conformen uns equips de flotació que, per diferència de densitat, separen els greixos i olis que es poden haver escolat en les aigües domèstiques, i es retiren amb unes rasquetes.

## 6.2 Tractament biològic

Tractament primari: En aquesta fase l'objectiu és decantar la matèria orgànica sedimentable i altres restes inorgàniques que no s'han retingut en el pretractament. Aquestes eliminacions són importants per disminuir la demanda d'oxigen en el tanc biològic que es troba en el tractament secundari.

El seu disseny i operació permet eliminar entre un 50-70% dels sòlids suspesos i, entre el 25-40% de la demanda biològica d'oxigen (DBO, en endavant) pot ser eliminat en el primer tractament. Aquesta matèria eliminada de l'efluent d'aigua és considerada com els fangs del tractament primari i es gestionen en la línia de tractaments de fangs.

Reactor biològic: La finalitat d'aquest tractament és accelerar el procés biològic i facilitar l'eliminació de la matèria orgànica gràcies a l'actuació de microorganismes aerobis. Es considera que els microorganismes utilitzen oxigen per consumir el substrat (matèria orgànica, és a dir, les molècules orgàniques biodegradables a l'aigua) i d'aquesta manera mantenir les seves pròpies funcions vitals, reproduir-se i "morir". Aquest procés permet transformar la matèria orgànica soluble en insoluble, fet que facilita la seva separació per decantació.

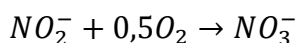
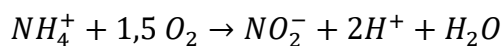
El procés més habitual és el tractament aerobi que s'anomena sistema de fangs actius. Per dur a terme aquest tractament són necessàries altes aportacions d'oxigen que deriven en altes despeses energètiques.

Segons la configuració que es determini, incloent-hi tractaments aerobis, anòxics i anaerobis es pot aconseguir eliminar matèria orgànica, nitrogen i fòsfor, ja que són nutrients pel creixement dels éssers vius i desembocar a l'eutrofització del medi.

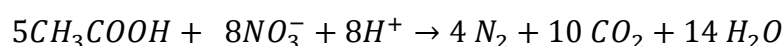
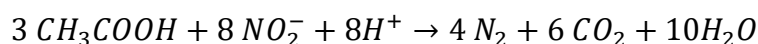
La configuració més emprada per eliminar nitrogen és la de Ludzack-Ettinger modificada (MLE) que conté una part anòxica (zona on es duu a terme la desnitrificació del nitrat formant nitrogen gas); i una segona part que és aeròbica (zona on es duu a terme la nitrificació del nitrogen amoniacal a nitrat) (Balaguer et al., 2007; Flores et al., 2003; Metcalf & Eddy, 2014).

**Nitrificació:**

En aquest procés es troben dos tipus de bacteris, els *ammonia oxidizing bacteria* (AOB) que oxiden l'amoni a nitrat i els *nitrite oxidizing bacteria* (NOB) que oxida el nitrit a nitrat (Claros, 2012; Larsen et al., 2015).

**Desnitrificació Heterotròfica:**

Els microorganismes que duen a terme el procés de desnitrificació són els *Organi-heterotrofic bacteria* (HET) que utilitzen substàncies orgàniques per generar energia i biomassa en condicions anòxiques. Per a la desnitrificació del nitrat es necessiten 2,86 grams de DQO (Demanda Química d'Oxigen) per cada gram de nitrogen i per la desnitrificació del nitrit 1,71 grams de DQO per cada gram de nitrogen. Per tant, la desnitrificació del nitrit es necessita una menor quantitat d'oxigen i substrat orgànic que per eliminar el nitrat (Larsen et al., 2015).



Aquests dos processos s'han de controlar bé, ja que una alta formació de nitrit podria provocar l'acumulació en el reactor i formar àcid nítrós i altes emissions de N<sub>2</sub>O i NO (de Graaff, Temmink, Zeeman, van Loosdrecht, et al., 2011).

Decantació secundària: En aquest tractament es vol separar l'aigua depurada dels fangs que es destinen a la línia de tractament de fangs, i una part dels fangs es recirculen per incrementar el temps de residència d'aquests microorganismes amb la intenció d'augmentar l'eficiència d'eliminació de matèria orgànica. Cal esmentar que sempre és necessari una purga en aquest procés, per tal de determinar el temps de residència cel·lular dels microorganismes. El sobrenedant, segons les seves pròpies característiques, pot ser abocat al medi receptor o prosseguir a un tractament terciari per aconseguir les característiques mínimes per abocar al medi.

---



Tractament terciari: Aquesta última fase, la qual és opcional segons la qualitat de l'efluent, es duen a terme tractaments com la cloració, la filtració de llits de sorra, osmosi inversa... Tots aquests processos són necessaris per assolir els objectius de mínim de contaminants presents a l'aigua.

## 6.3 Tractament de fangs

L'objectiu final d'aquest tractament és poder estabilitzar i deshidratar els fangs resultants del tractament biològic.

Espessidor de fangs: Es tracta del primer element que es troba en la línia de fangs. La finalitat és reduir el volum dels fangs eliminant l'aigua que hi ha i així obtenir uns fangs més concentrats per poder tenir més eficàcia en els tractaments posteriors. Les operacions més utilitzades són la sedimentació per gravetat, la flotació i la centrifugació, a partir de les quals s'aconsegueix una concentració de sòlids del 4 al 6% (Metcalf & Eddy, 2014).

Digestor de fangs: Aquest tractament pot ser anaerobi i és un dels més importants, ja que permet l'estabilització biològica dels fangs. No es troba present en totes les línies de fangs, però en el cas de l'Estació Depuradora d'Aigües Residuals (EDAR, en endavant) de Girona i Tarragona sí que s'hi troben presents (A.C.A.; Dolors Balaguer et al., 2007; Metcalf & Eddy, 2014). Aquestes ciutats tracten aigües residuals generades per a més de 100.000 habitants, fet que proporciona una quantitat de fangs suficients per assolir la quantitat necessària de biogàs per compensar els costos d'inversió i operació que suposa la instal·lació (Garrido-Baserba et al., 2018).

Aquest procés consisteix en la descomposició de la matèria orgànica amb l'ajuda dels microorganismes en absència d'oxigen, amb un gas que té una gran quantitat de metà i que s'anomena biogàs i uns fangs residuals que es poden utilitzar com a fertilitzants.

Deshidratació de fangs: En aquesta fase es redueix el contingut d'humitat dels fangs permetent una fàcil i menor manipulació, transport i cost. Hi ha els mètodes naturals, com les eres d'assecatge o els mètodes mecànics, com és el cas de la centrífuga que és la més utilitzada a les EDARS, i que permet gestionar aquests fangs gràcies a la seva valorització agronòmica.

### **6.3.1 Gestió dels fangs**

Pel que respecte a la gestió dels fangs hi ha molts mètodes per gestionar-los ,però la majoria tenen com a destí la incineració, la disposició als abocadors i l'aplicació al sòl. Aquesta última iniciativa és la més utilitzada a Catalunya (A.C.A.-a)

Valorització agronòmica: Els principals nutrients de profit són el N, P i K que requereixen un ajustament de la dosificació dels fertilitzants segons els cultius i característiques del sòl. La utilització agrícola dels fangs té uns costos reduïts que repercuteixen en la contenció de la despesa econòmica dels processos de tractament d'aigües residuals. Aquesta gestió és viable sempre i quan hi hagi una disposició de terrenys aptes pròxima a les plantes de tractament, i quan la qualitat de fangs no tingui un elevat contingut de metalls pesants i no hi hagi una complexitat de gestió i control dels fangs (Balaguer et al., 2007).

Valorització energètica: A Catalunya s'utilitzen els fangs com a combustible per a la producció de ciment, ja que aquesta indústria consumeix una gran quantitat d'energia, i el seu ús pot ajudar a abaratir els costos del procés. (Kahn & Hill, 1998; Leible et al., 2002)

Dipòsit controlat: A causa del seu risc d'impacte ambiental, aquesta gestió ha de ser la darrera prioritat en la jerarquia de gestió de residus, ja que ocupa terrenys innecessaris que podrien destinar-se a altres usos. Malgrat que aquests dipòsits generen metà i lixiviats que cal gestionar, esdevenen necessaris quan els fangs no es poden valoritzar agronòmicament a causa dels metalls pesants.

## 7 Noves propostes de tractaments d'aigua

En aquest apartat s'expliquen les diferents propostes que es duran a terme per afrontar el problema de la futura escassetat d'aigua i millorar l'eficiència en la recuperació de nutrients.

Primer, s'analitzen els tipus de gestions quant a agrupament d'habitatges que es poden fer per tractar les aigües residuals domèstiques. Seguidament, s'estudien com es poden separar diferents components de les aigües residuals domèstiques, millorant la recuperació de nutrients. Finalment, es presenten les diferents tecnologies per tractar les aigües residuals domèstiques i les d'origen meteorològic.

### 7.1 Centralitzat, descentralitzat o híbrid?

En primer lloc, és necessari definir els conceptes de *centralitzat*, *descentralitzat* i *híbrid* (Eggimann et al., 2015).

Centralitzat: És la gestió del tractament de les aigües residuals que es duu a terme avui dia, en la qual cada zona d'estudi té una única planta convencional de fangs actius a tractar.

Descentralitzat: El concepte de descentralitzat pur preveu tractar aquelles aigües residuals originàries d'un edifici "in situ".

Híbrid: Aquest concepte és el més ambigu, ja que hi ha molts matisos respecte de les dues idees explicades prèviament. Com a definició, l'híbrid és qualsevol gestió que sigui diferent d'una única planta de tractament per tota una zona d'estudi (centralitzat) o d'una planta de tractament per edifici que generi aigües residuals.

Actualment, hi ha estudis sobre quina és la millor gestió des d'un punt de vista de la distribució de les plantes de tractament d'aigües residuals (EDAR) com l'estudi de (Eggimann et al., 2015) on estudia el cas d'una població de Suïssa i determina quin és el grau de descentralització referent al component econòmic. Altres com l'estudi de (Rabaey et al., 2020), creuen que en el sector de l'aigua és necessària una

descentralització total com es planteja en el sector de l'energia elèctrica i de les telecomunicacions.

Per aquest motiu, en aquest treball es vol estudiar quin podria ser el grau de descentralització òptim tenint en compte les noves tecnologies.

### Quantificació del grau de descentralització

En l'estudi de Eggimann et al. (2015) es va adaptar una fórmula de Ambros (1996) per poder definir el grau de descentralització el qual s'està estudiant:

$$DC = \frac{\sum_{i=1}^n N_i - \sum_{j=1}^m \frac{M_j}{B_j}}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad (\text{Eq. 1})$$

Per aquest estudi que segueix un concepte similar concepte de descentralització que l'exposat per Eggimann et al. (2015), M és el volum d'aigua residual que ha de ser tractada en una planta de tractament, N el volum d'aigües residuals originades d'un habitatge i B el nombre d'habitatges connectats a una planta de tractament. Aquests valors se sumaran per totes les fonts de generació d'aigües residuals ( $i= 1, \dots, n$ ) i plantes de tractament ( $j=1, \dots, m$ ). Un cop s'estudiï quina és la gestió òptima també es quantificarà quin és el grau de descentralització, on una DC=0 indica que és un descentralitzat pur i un DC=1 vol dir que la gestió és centralitzada.

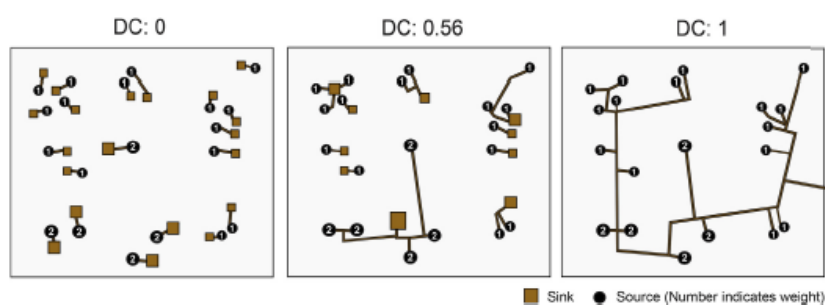


Figura 24. Relació del grau de descentralització dels habitatges i els punt de tractament de les aigües residuals.  
Font:(Eggimann et al., 2015)

## 7.2 Aigües residuals d'un habitatge i tipus de separacions

En aquest apartat, s'explica les aigües residuals provinents d'un habitatge, l'interès que hi ha per la seva separació i formes de com separar-les.

### 7.2.1 Tipus d'aigües domèstiques

A continuació, es detallen els diferents tipus d'aigües residuals que es poden trobar en un habitatge.

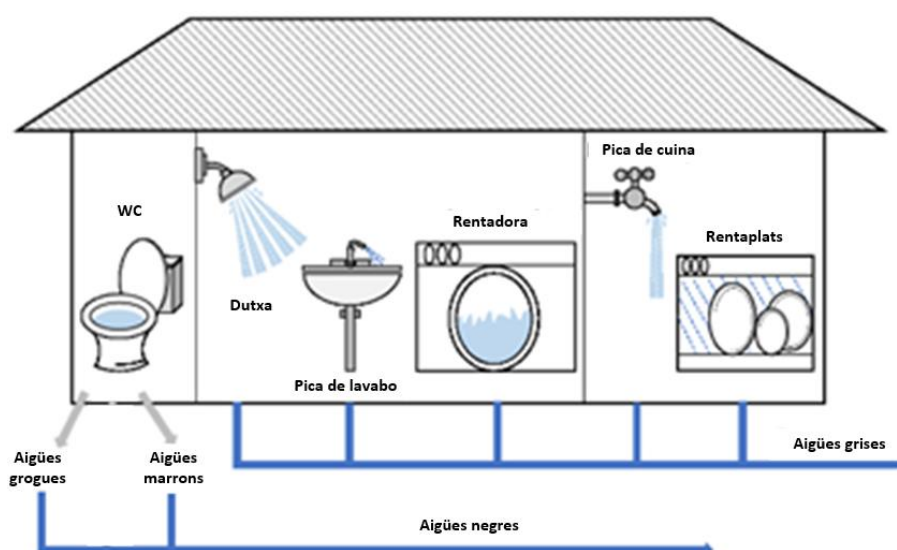


Figura 25. Esquema dels diferents tipus d'aigües residuals d'un habitatge. Font:(Huang, 2019)

#### Aigües negres:

Les aigües negres són aquelles que són producte de l'ús del WC i són el conjunt de les aigües grogues i marrons.

- Grogues (origen: orina)

Pel que respecte a aquestes aigües, la càrrega orgànica és baixa, però té un percentatge del 79, 47 i 71 de nitrogen, fòsfor i potassi, respectivament. Seria un bon recurs com a fertilitzant, encara que s'ha de controlar la hidròlisi de la urea, ja que es pot perdre fins un 90% del nitrogen (N, d'ara endavant) que es troba en l'orina (Larsen et al., 2015) . En l'apartat 7.3.2 s'explica quins detalls

s'han de tenir en compte amb l'orina i com tractar-la per poder recuperar els seus nutrients.

- Marrons (origen: excrements i paper de lavabo)

Pel que respecte a les aigües marrons a diferència de les grogues, contenen una gran càrrega orgànica i menor percentatge de nutrients en forma de N o P. Aquesta comparació es pot observar a la Taula 14 i Figura 26.

#### Aigües grises:

Aquestes aigües són les que tenen major volum de les aigües residuals totals d'un habitatge, en concret s'estima que el volum generat diàriament és de 108 litres per persona i es poden diferenciar dos tipus (Larsen et al., 2015):

- Dèbils (origen: dutxa i pica del bany)

Aquestes aigües aporten una menor càrrega de contaminants en forma de DQO o nutrients però major càrrega de patògens.

- Fortes (origen: cuina i electrodomèstic que apliquen aigua)

Aquestes aigües són les que contribueixen majoritàriament a incrementar la concentració de contaminants que ajuden a l'eutrofització de les aigües residuals.

Les seves característiques poden ser molt variants, però dependent sobretot de 3 factors (Eriksson et al., 2002) :

1. La qualitat d'abastament de l'aigua
2. El tipus de xarxa de distribució de les canonades
3. L'activitat de l'habitatge

## **7.2.2 Separació d'efluents**

La separació dels efluents és un concepte necessari com a forma de gestió i recuperació de nutrients de les aigües residuals. Aquest interès és a causa de les diferents característiques que rau en cada tipus d'aigua residual que sorgeix d'un habitatge. A continuació, la Figura 26 es mostren els percentatges de volum i massa

dels nutrients que es troben en els diferents tipus d'aigües i així entendre les magnituds respecte a percentatge (Höglund, 2001; Todt et al., 2015):

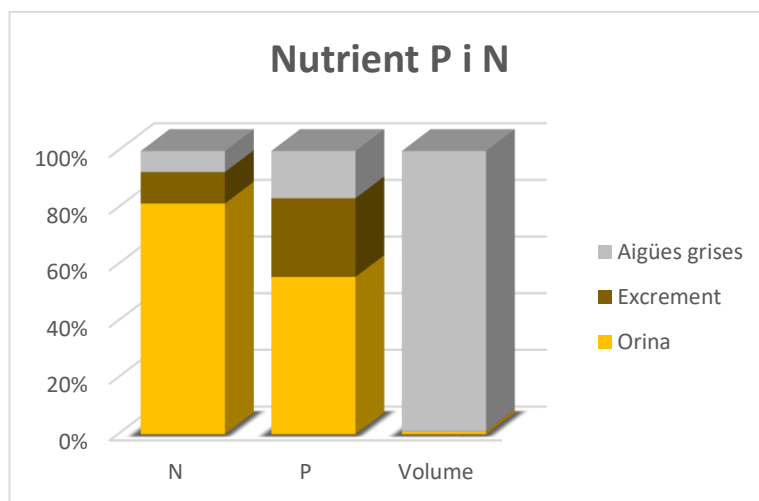


Figura 26. Percentatge de nutrients en massa i volum segons l'origen de les aigües residuals

Actualment, tant les aigües grises com les aigües negres són barrejades i transportades cap a la planta convencional de fangs actius. Allà es podria realitzar la recuperació d'aquests nutrients, però el procés és molt complicat i inviable econòmicament, ja que són necessaris uns equips de major volum per recuperar un nutrient que es troba molt diluït.

La separació d'efluents ajudarien a poder tractar aquestes aigües amb una alta concentració de nutrients, sense barrejar-les amb les aigües grises que ocupen un elevat volum i una baixa concentració de Nitrogen Total (NT, d'ara endavant) i fòsfor Total (PT, d'ara en davant).

Aquesta separació consisteix a fer diverses canalitzacions segons el tipus d'aigües que es volen separar. En aquest treball es consideren 2 o 3 tipus de canalitzacions. La principal canalització és la que recull les aigües grises de tot l'habitatge i la segona o la tercera dependran de la separació d'efluents que es vulgui fer al WC. Si es decideix tractar totes les aigües del WC per igual (aigües negres), hi ha un total de 2 canalitzacions en l'habitatge. I si es decideix separar l'orina dels excrements per poder tractar-los i gestionar-los de diferent manera hi ha un total de 3 canalitzacions.

A continuació, la Taula 14 es mostra la massa dels contaminants que es poden trobar en els diferents tipus d'aigües (Larsen et al., 2015; Maurer et al., 2006; Remy, 2010):

Taula 14. Resum de les diferents càrregues màssiques segons la separació de les aigües

g/persona·dia	Grises	Negre	Groc	Marró
DQO	51	52,8	15,6	37,2
DBO	19	17,8	5,8	12
TN	0,9	10	8,8/13,2	1,2
NH4-N	0,32	9	7,92/0,69	1,08
N-NH3	0,6	0	0	0
TP	0,5	1,3	0,79	0,51
TSS	19	41,8	0	41,8
VSS	6,9	33,44	0	33,44

Cal esmentar que els grams de NT i amoni en les aigües grogues i negres varien a causa de la hidròlisi del nitrogen en forma d'amoni. En l'apartat 7.3.2 s'explica com es fa un tractament per evitar aquesta hidròlisi, i així, tenir una aigua amb més càrrega de nitrogen.

#### Interès de la recuperació dels nutrients

Aquest gran interès en la recuperació de nutrients és a causa del decreixement del recurs fòsfor, que és un nutrient no renovable el qual ha atret l'atenció dels científics pel seu reciclatge i reus (Carrillo et al., 2020; Cordell et al., 2009, 2011; Mayer et al., 2016). El recuperar fòsfor de les aigües residuals no només redueix la contaminació provocada per extreure aquest nutrient, sinó que facilita a no dependre dels països amb millor accés a aquest recurs (Cid et al., 2018).

S'estima que aquest recurs es podria acabar d'aquí 100-200 anys segons com evolucioni la seva explotació, ja que es tarda entre 10-15 milions d'anys en formar-



se (Gilbert, 2009; Tarragó et al., 2016), la qual cosa ha fet que el seu cost vagi incrementant-se en els darrers anys (Larsen et al., 2015).

El 80-90% de la producció del fosfat, sol ser utilitzat com a fertilitzant (US Geological Survey, 2010) per les plantes que l'utilitzen per al seu creixement, per tant, és important assegurar l'obtenció d'aquest nutrient per assegurar la producció de menjar (Larsen et al., 2015). Es pot concloure que és un nutrient molt crític per les plantes i pel creixement i desenvolupament de la població actual (Cordell et al., 2009).

Per altra banda, amb les tecnologies proposades en la secció 7.3.2 també es pot recuperar nitrogen. Aquesta recuperació és igual de rellevant que la del fòsfor pel creixement i desenvolupament de les plantes, i per consegüent per assegurar la producció de menjar en un futur pròxim. La seva recuperació no resulta tan crítica com la del fòsfor, ja que és un element més abundant i es podrien dur a terme processos per fixar el nitrogen gas als sòls. En aquest cas, en el 2010 es va fixar al sòl 120 tones de nitrogen, gairebé el doble de nitrogen que es fixa de forma natural (63 tones) (Fowler et al., 2013).

Finalment, cal destacar que actualment aquests fertilitzants es produeixen amb un elevat consum de combustibles fòssils (McCarty et al., 2011)., per la qual cosa és interessant estudiar noves tecnologies que els puguin produir tal com seria el cas de la proposta presentada, que alhora permet una reutilització de l'aigua.

### **7.2.3 Tipus de WC**

En aquest apartat s'explica els diferents tipus d'inodor que es tenen en compte en l'estudi, les concentracions de cada contaminant i els costos associats d'instal·lació.

#### **CONVENCIONAL**

Els lavabos convencionals, als quals la societat actual està més acostumada, són els que contenen un colze en el desaigües on l'aigua es pot mantenir retinguda. En aquest inodor per aconseguir que la matèria fecal o orina s'expulsi és necessari un gran cabal d'aigua en un temps molt curt, ja que el seu transport és per gravetat.

---

Aquests lavabos consumeixen molta més aigua respecte a altres tipus de WC, de mitjana l'inodor pot consumir 8 litres per cada vegada que s'utilitza, provocant un consum de 40 litres per persona i dia, amb un cost mitjà d'instal·lació de 100 €/unitat (De Graaff et al., 2010; Larsen et al., 2015).

### AL BUIT

El WC al buit és bastant comú en zones mòbils, com seria el cas de lavabos en trajectes de transport públic, com els avions, trens o autocars. Aquests WC fan servir l'aire per evacuar les aigües negres a causa d'una diferència de pressió que són generades per bombes al buit, que extreuen l'aire d'un volum tancat.

Aquests lavabos permeten reduir la quantitat d'aigua respecte als lavabos convencionals, també permeten tractar les aigües negres separades de les altres tipologies, i així poder aprofitar les seves altes concentracions de matèria orgànica i nutrients per poder recuperar nutrients aprofitant la reducció de volum dels processos (De Graaff et al., 2010).

Per finalitzar, és necessari saber que de mitjana el consum d'un lavabo al buit és de 5 litres per persona i dia, i té un cost mitjà d'instal·lació de 700 € cada unitat (De Graaff et al., 2010).

### SEPARACIÓ D'AIGÜES GROGUES I MARRONS: Nomix

El tipus d'inodor Nomix, separa les restes fecals de les restes orinals. Es considera el més eficient des del punt de vista sostenible, ja que permet separar les aigües marrons de les grogues i fer tractaments de diferents tipus per aconseguir recuperar el màxim de nutrients o energia d'aquestes aigües.

La separació dels residus fecals i orinals és bastant complicat, pel fet que depèn del correcte ús dels lavabos. Aquest ús pot fer varia entre un 60-90% d'orina separada correctament. Però tot això depèn del correcte ús que en facin els usuaris (Johansson et al., 2001). En alguns estudis fets en una planta pilot a Alemanya s'obtenia una separació del voltant del 33-41% (Peter-Fröhlich et al., 2007) . Però en l'estudi de (Rossi et al., 2009) i (Larsen & Liernert, 2007) es va determinar que es

pot recuperar al voltant del 70-75% d'orina. Per tant, en aquest estudi se suposa que al voltant del 75% de l'orina se separa correctament en aquests lavabos i l'altre 15% se separa amb el compartiment dels excrements.

Per finalitzar, és necessari saber que aquest estudi s'utilitza per al consum d'un lavabo Nomix: 1,5 litres per persona i dia per a les aigües grogues, i 15 litres per persona i dia per a les aigües marrons amb un cost d'instal·lació mitjà de 1000 €/unitat (Garrido-Baserba et al., 2022).

A continuació, la Figura 15 mostra un resum dels diferents tipus de lavabos que es tenen en compte en aquest estudi i de la concentració dels contaminants que es poden trobar coneixent la càrrega màssica per persona i dia de la Taula 14.

Taula 15. Taula resum dels preus, funcionament i quantitat d'aigua a utilitzar

WC	CAPEX	AIGUA (L/persona-dia)	FUNCIONAMENT
Convencional	100€	40	Gravetat
Al buit	700€	5	Al buit
Nomix	1000€	15+1,5	Gravetat

A la següent taula s'observa les diferents concentracions de contaminant segons l'inodor utilitzat.

Taula 16. Concentracions dels contaminants segons el tipus d'aigua i inodor utilitzat

(mg/L)	Grises	Convencional. Negre	Al buit. Negre	NoMix. Groc	NoMix. Marró
DQO	472	1320	10560	10400	2480
DBO	176	445	3560	3867	800
TN	8,3	250	2000	5867	80
NH4-N	2,96	225	1800	460	72
N-NH3	5,56	0	0	0	0
TP	4,63	32,5	260	526,7	34
TSS	176	1045	8360	0	2787
VSS	64	836	6688	0	2229

## 7.3 Tractaments i costos associats

En aquest apartat s'expliquen els tractaments que es considera que es podrien dur a terme per cada línia d'aigües i com es calculen els seus costos. Cal remarcar que les aigües residuals tractades serveixen com a font per a les aigües d'ús no potable (aigua de dutxa, aigua de rentadora...), i pel consum potable (per beure i pica del lavabo) s'intenta utilitzar les aigües recollides d'origen pluvial. També és important comentar que l'estudi dels tractaments dels fangs no és l'objectiu d'aquest treball, pel qual es considera que seguiran el mateix tractament que en l'actualitat. Així doncs, els costos finals del tractament òptim no tindran en compte aquest concepte.

Per fer la valoració de costos econòmics s'utilitza el concepte de CAPEX i OPEX.

- CAPEX: és el CAPital EXpenditures, és la inversió capital inicial que es fa per dur a terme un tractament.
- OPEX: és el OPerating Expense, és el cost de manteniment i operació a causa del funcionament del tractament emprat. Normalment es valora com una despesa anual. Per poder tenir en compte la variació econòmica amb el pas dels anys s'utilitza el VAN (Valor Actual Net):

$$VAN = \sum_{t=1}^{t=30} \frac{opex\ anual}{(1+r)^t} \quad (\text{Eq. 2})$$

Com es pot observar, per aquest treball s'ha determinat un temps de vida de les tecnologies és de 30 anys i hi ha un interès del 5% (r) tal com es va fer a l'estudi de Roefs et al. (2017).

Per tant, en els següents apartats es definiran com es calculen els Opex anuals i en la formulació d'optimització s'aplica el VAN per poder conèixer el cost total del tractament al llarg dels 30 anys determinats.

Per fer la valoració dels beneficis econòmics, també es té en compte l' Eq.2. Per tant, en els tractaments que tinguin un benefici associat es definiran com es calculen els beneficis anuals i en la formulació d'optimització s'aplica el VAN, i així poder conèixer els beneficis totals de les tecnologies en el seu temps de vida útil.

Finalment, és necessari esmentar que a continuació es fa una explicació teòrica dels càlculs de cada tractament, però es deixa en funció d'equacions genèriques perquè seguidament es procedeix a la seva optimització.

### 7.3.1 Etapa 1 i 2: tractament per les aigües negres o marrons

Per tractar aquestes aigües en la proposta que es fa per modelitzar els tractaments es segueix la següent seqüència:

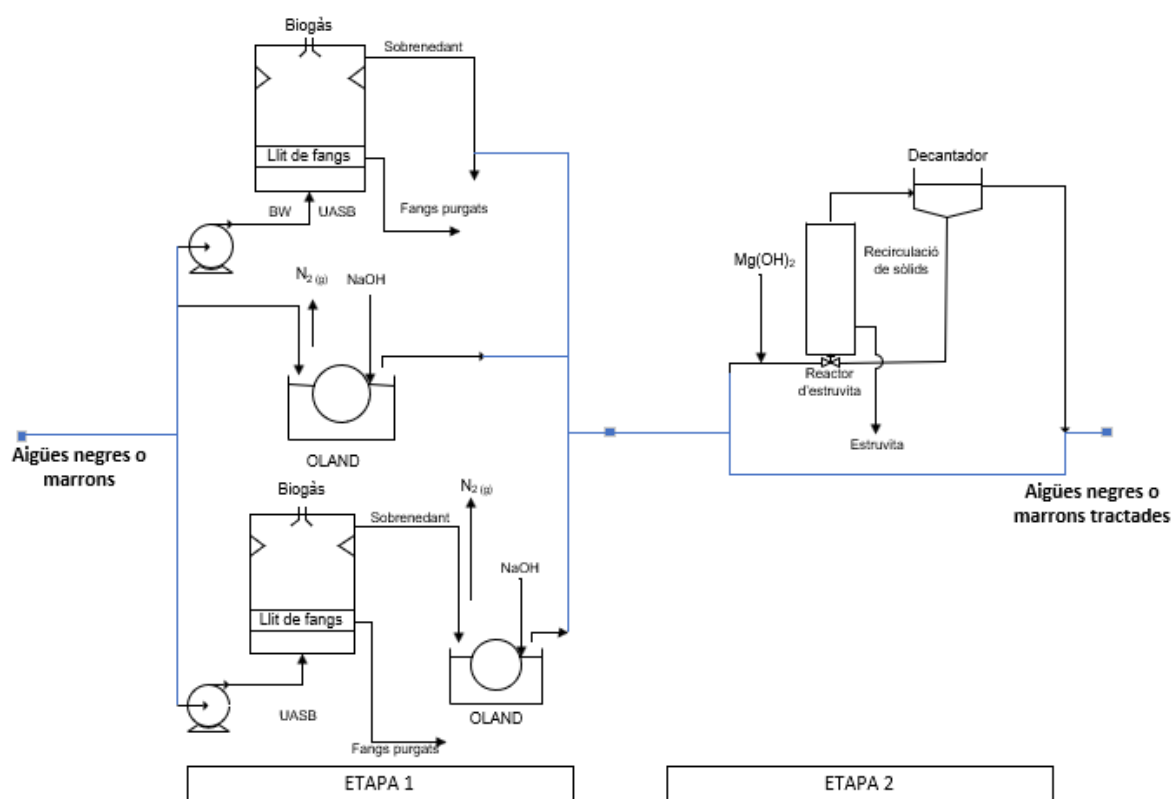


Figura 27. Configuració proposada pel tractament d'aigües negres o marrons

És necessari esmentar que l'Oland, tractament focalitzat a eliminar els NT de les aigües residuals, s'ha de situar en una configuració on es trobi abans del reactor d'estruvita, tractament que se centra en la recuperació d'estruvita, per poder disminuir les seves impureses obtingudes en la cristal·lització.

## Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)

El UASB (Reactor anaeròbic de flux ascendent) és un tractament que es basa en la digestió anaeròbia, procés que es realitza gràcies a uns microorganismes que consumeixen la biomassa dins del mateix reactor. S'anomena anaeròbia perquè els microorganismes poden descompondre la matèria orgànica i créixer en un ambient lliure d'oxigen (Batstone et al., 2002). Els processos que esdevenen clau en aquest tractament són (Garrido-Baserba et al., 2018; Weiland, 2010):

- Hidròlisi: És l'etapa que limita l'eliminació de matèria orgànica i la producció de biogàs. Els enzims exocel·lulars produeixen monòmers i dímers solubles a partir de bio-polímers.
- Acidogènesi: Els bacteris acidogènics converteixen els components orgànics solubles en àcids grassos volàtils i diòxid de carboni.
- Acetogènesi: Els bacteris acetogènics converteixen els àcids grassos a acetat, hidrogen i diòxid de carboni.
- Metanogènesi: els bacteris utilitzen àcid acètic o hidrogen i diòxid de carboni per produir metà.

Un UASB es dissenya per tractar el resultat de les aigües residuals, però per tractar aigües negres s'ha de tenir un correcte establiment del llit de fangs al seu interior (de Graaff, Temmink, et al., 2010).

El nivell d'hidròlisi és un factor limitant a causa de les altes concentracions de sòlids. Per aquest motiu és necessari aplicar temps de retenció de sòlids (SRT, en endavant) alts per obtenir un nivell d'hidròlisi adequat i aconseguir una correcta estabilització dels fangs a l'interior de l'UASB. En un estudi fet per en De Graaff, Temmink, et al. (2010), amb una temperatura de 25 °C i un SRT de 254 dies es va assolir un nivell d'hidròlisi del 53% mentre que amb 75 dies s'obté fins a un 49% el qual té una important repercussió en el volum de l'UASB.

Una vegada conegut el SRT i el nivell d'hidròlisi es pot determinar el temps de retenció hidràulic (HRT, en endavant) amb la següent fórmula (Zeeman & Lettinga, 1999):

$$HRT = C \cdot \left(\frac{SS}{X}\right) \cdot R \cdot (1 - H) \cdot SRT \quad (\text{Eq. 3})$$

C: concentració DQO (g/L)

SS: fracció DQO suspesa a l'influent que pren el valor de 0,65 g/L

X: concentració de fangs a l'interior del reactor que pren el valor de 34,2 g DQO/L

R: fracció sòlids eliminats que pren el valor de 0,93

H: nivell d'hidròlisi que pren el valor de 0,49

SRT: temps de retenció dels sòlids que són 75 dies

En aquest cas, el HRT depèn de la concentració de DQO a l'influent el qual depèn de si es tracten aigües negres o marrons. Per tant, el HRT no es pot determinar fins que no se sàpiga quina és la configuració més adient des de la perspectiva econòmica.

De Graaff, Temmink, Zeeman, & Buisman (2011) també van estimar els percentatges d'eliminació que es poden assolir en el reactor, afegir que aquests percentatges van referits a massa.

Taula 17. Percentatge d'eliminació al reactor UASB

	Percentatge d'eliminació (%)
DQO	78
DBO	100
NT	9
PT	39
SST	93
SSV	95

Per últim, bona part del nitrogen orgànic esdevé nitrogen en forma d'amoni a causa de les condicions anaeròbiques, per tant, el 83% del NT es troba en forma d'amoni (De Graaff, et al., 2010).

Pel que respecta al càlcul del cabal de l'efluent del UASB s'ha optat per considerar les concentracions de DQO en l'influent i l'efluent considerades a la literatura de De Graaff et al. (2010) on els valors eren de 9.800 i 2.400 mg/L respectivament, i segons l'eliminació que es descriu a la Taula 1 es pot calcular el sobrenedant obtingut i el cabal de fangs que s'han de purgar.

---

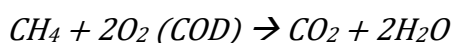
$$Q_{out} = Q_{in} \cdot \frac{9800}{2400} \cdot (1 - 0,78) \quad (\text{Eq. 4})$$

$Q_{out}$ : Cabal volumètric de sortida ( $m^3/\text{dia}$ )     $Q_{in}$ : Cabal volumètric d'entrada ( $m^3/\text{dia}$ )

### Obtenció de biogàs:

El biogàs que es pot obtenir depèn de la quantitat de DQO que hi hagi a les aigües a tractar i el nivell d'hidròlisi, per tant, del 78% de DQO que el reactor aconsegueix eliminar, només el 49% s'utilitza per aconseguir metà. Per cada gram de DQO eliminat s'aconsegueix 0,35 litres de metà en condicions normals. També es va determinar que el biogàs resultant del tractament de les aigües negres podia arribar a contenir un 78% de metà (De Graaff, Temmink, et al., 2010; Metcalf & Eddy, 2014).

El biogàs que s'obté es troba en condicions estàndard, però sabent que un mol de metà ocupa 24,45 L a aquestes condicions segons la llei dels gasos ideals, es pot conèixer el biogàs obtingut en funció de la DQO tractada.



$$24,45 \frac{L CH_4}{1 mol CH_4} \cdot \frac{1 mol CH_4}{2 mols DQO} * \frac{1 mol DQO}{32 g DQO} = 0,382 \frac{L CH_4}{g DQO}$$

$$m_{in_{DQO}} \frac{g DQO}{dia} * 49\% * \frac{0,382 L CH_4}{1 g DQO} = m_{in_{DQO}} \cdot 0,19 L CH_4/dia$$

$$m_{in_{DQO}} * 0,19 \frac{L CH_4}{dia} \cdot \frac{100 L biogàs}{78 L CH_4} = m_{in_{DQO}} \cdot 0,24 L biogàs/dia$$

$$Q_{biogàs} = m_{in_{DQO}} \cdot 0,24 \quad (\text{Eq. 5})$$

$Q_{biogàs}$ : Cabal volumètric de biogàs (L/dia)

$m_{in_{DQO}}$ : Cabal màssic d'entrada de DQO (gr/dia)

Aquesta dada s'estableix en funció de la DQO a l'influent, ja que el seu valor varia segons si es tracten aigües negres totals o aigües marrons.

En aquest treball no es contempla l'ús del biogàs com a combustible per assolir la temperatura necessària de treball del reactor, ja que seria necessari un tractament intermedi per poder purificar el biogàs i tenir un bon rendiment de la seva cremada.



Per aquest motiu, es decideix optar per la venda del biogàs i pagar l'energia elèctrica necessària per poder aconseguir la temperatura de treball del reactor.

L'influent del UASB pot ser aigües negres amb diferent concentració o marrons, per tant, tenen una alta concentració de matèria orgànica. Segons l'estudi de De Graaff, Temmink, et al. (2010) aquestes aigües poden estar a una temperatura de 20 °C i si el nostre reactor treballa a 25 °C, només cal aportar l'energia necessària per augmentar la temperatura 5 °C.

Per calcular l'energia que s'ha de subministrar s'ha utilitzat una densitat i calor específica de l'influent de 1020 kg/m<sup>3</sup> i 4,2 kJ/Kg°C (Metcalf & Eddy, 2014). A l'hora de subministrar l'energia hi ha una pèrdua de calor pel que es considera una eficiència global del 80% (Metcalf & Eddy, 2014).

$$\dot{Q} = m \cdot cp \cdot \Delta T \quad (\text{Eq. 6})$$

$$\dot{Q} = Q_{in} \frac{m^3}{dia} \cdot 1.020 \frac{kg}{m^3} \cdot 4,2 \frac{kJ}{Kg \cdot ^\circ C} \cdot (25 - 20) = Q_{in} \cdot 21.420 \quad (\text{Eq. 7})$$

$$\dot{Q} = Q_{in} \cdot 21.420 \frac{kJ}{dia} \cdot \frac{100 kJ}{80 kJ} \cdot \frac{1 dia}{86400 s} \cdot \frac{h}{h} \cdot \frac{24 h}{1 dia} \cdot \frac{365 dies}{1 any} = Q_{in} \cdot 2.714,69 \quad (\text{Eq. 8})$$

$\dot{Q}$ : Calor a aportar a l'influent (Kwh)

Aquesta energia que s'ha d'aportar depèn del cabal volumètric de l'influent, per tant, s'ha de deixar en funció d'aquest.

### Costos associats:

El càlcul dels costos associats a aquell treball s'han obtingut mitjançant la metodologia emprada per Garrido-Baserba et al. (2018, 2022) és el següent:

#### CAPEX:

Per fer aquest càlcul Garrido-Baserba et al. (2022) van plantejar els costos lineals extrapolats d'un simulador CapdetWorks on les aigües d'entrada eren a 25°C igual que aquest estudi. Si la temperatura d'entrada del reactor fos diferent, seria necessari fer una simulació amb les noves condicions.

$$CAPEX = (66,75 + 211,67) \cdot Persones \quad (\text{Eq. 9})$$

OPEX:

Per fer aquest càlcul es va plantejar els costos lineals extrapolats d'un simulador CapdetWorks i s'ha afegit el cost necessari per poder incrementar la temperatura de les aigües negres o marrons de 20 °C a 25 °C, tenint en compte que el preu de l'electricitat en el moment de realitzar aquests càlculs és de 0,30 €/kWh.

$$OPEX = 0,3 \cdot Q_{in} \cdot 2.714,69 + 0,9017 \cdot \text{persones} \quad (\text{Eq. 10})$$

$Q_{in}$ : cabal volumètric de l'influent (m<sup>3</sup>/dia)

Ingressos associats:

Els beneficis associats per la vena del biogàs no purificat, la qual pot aportar uns beneficis de 0,126 €/m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> en condicions normals (Deng & Hägg, 2010). Per calcular el benefici és necessari conèixer la quantitat equivalent de m<sup>3</sup> de metà en condicions normals, per fer-ho s'aplica la llei de Charles:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (\text{Eq. 11})$$

$T_1, T_2$ : Kelvins                       $V_1, V_2$ : L/dia

$$\frac{m_{inDQO} \cdot 0,19 \text{ L CH}_4/\text{dia}}{298,15} = \frac{V_2}{273,15}; V_2 = m_{inDQO} \cdot 0,174 \text{ L } \frac{\text{CH}_4}{\text{dia}} \text{ en CN}$$

$$\text{Beneficis} = m_{inDQO} \cdot 0,174 \text{ L } \frac{\text{CH}_4}{\text{dia}} \text{ en CN} \cdot \frac{1\text{m}^3}{1000\text{L}} \cdot \frac{365\text{dies}}{1\text{any}} \cdot \frac{0,126\text{€}}{1\text{m}^3\text{CH}_4 \text{ en CN}}$$

$$\text{Beneficis} = m_{inDQO} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \quad (\text{Eq. 12})$$

$\text{Beneficis}$ : €/any                       $m_{inDQO}$ : cabal màssic de DQO de l'influent (gr/dia)

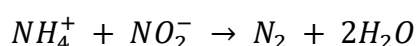
Aquesta dada es deixa en funció de la DQO a l'influent, ja que el seu valor varia segons si es tracta d'aigües negres totals o aigües marrons.

Aquests beneficis i costos són paràmetres que el programa de GAMS té en compte a l'hora de fer l'optimització del conjunt del model.

## Oxygen-Limited Autotrophic Nitrification/Denitrification (OLAND)

El procés Oland (Nitrificació i Desnitrificació autotròfica amb limitació d'oxigen) consisteix en un biodisc d'una sola etapa amb una limitació d'oxigen que aconsegueix eliminar l'amoni en forma de nitrogen gas a l'atmosfera. Aquesta eliminació es duu a terme gràcies al procés *Anaerobic Ammonium Oxidation* (Anammox, d'ara endavant). El biodisc està format per un reblliment de clorur de polivinil (PVC) i opera a 2,5 rpm amb un 58% de submersió del disc. Aquests dos factors ajuden a controlar l'oxigen dissolt (Windey et al., 2005).

El procés anammox és un procés biològic d'un sol pas on l'amoni passa directament a nitrogen gas (Kuai & Verstraete, 1998). En aquest procés, l'amoni passa per dues etapes perquè s'oxidi a nitrogen gas, ja que necessita una espècie que el redueixi. A la primera etapa, l'amoni és oxigenat, la meitat d'aquest s'oxida a nitrit (s'anomena oxidació parcial). Aquest procés el duu a terme els AOB que són autotròfics (veure reacció a sota). La segona etapa és la reacció anaeròbia on l'amoni passa a nitrogen gas a partir del procés anammox (veure reacció a sota).



En el procés anammox interessa que el nitrit format no passi a nitrat, ja que podria reduir la seva eficiència de reacció. Per tant, és important inhibir els NOB que són autotròfics (Claros, 2012; Larsen et al., 2015). Per fer-ho, es decideix treballar a una baixa concentració d'oxigen (<0,2 mg O<sub>2</sub>/L) que afavoreix el creixement dels AOB envers els NOB (Larsen et al., 2015).

Per obtenir unes eficiències òptimes pel procés anammox són necessàries unes condicions de treball de pH de 6,4-8,3 i una temperatura de 37-40°C, encara que s'ha estudiat i verificat la factibilitat de treballar a temperatures menors com la de 25°C (De Graaff, Temmink, Zeeman, van Loosdrecht, et al., 2011; Dosta et al., 2008; Vlaeminck et al., 2009). Per tant, si l'influent de l'OLAND té un pH de 7,6 i una temperatura de 25 °C es pot entendre que les condicions tenen una viabilitat per dur a terme el procés anammox.

Vlaeminck et al. (2012) i Roefs et al. (2017) van estimar els percentatges d'eliminació que es poden assolir en el procés, cal dir que aquests percentatges van referits a massa.

Taula 18 Percentatge d'eliminació a l'OLAND

	Percentatge eliminat (%)
DQO	38
TN	70
TP	8
TSS	38

Pel que respecta al càlcul del cabal de l'efluent de l'OLAND s'estima negligible, ja que el procés anammox permet consumir un 63% menys d'energia, reduir al 100% les necessitats d'un agent reductor i produir un 90% menys dels fangs respecte al procés biològic convencional d'eliminacions de nitrògens explicat a l'apartat 6.2.

#### Costos associats:

##### CAPEX:

Aquests costos respecte a l'estudi fet per (Courstens et al., 2014) es van estimar com 1.686 €/m<sup>3</sup> de reactor.

Pel càlcul del volum d'aquest reactor primer s'ha de determinar l'àrea del biofilm:

$$BFS = \frac{N_{influent}}{N_{surface\ load}} \quad (\text{Eq. 13})$$

*BFS*: Biofilm Surface (m<sup>2</sup>)

La càrrega superficial de nitrogen se suposa la mateixa que la proposada en l'estudi de Roefs et al. (2017) que és un valor de 0,015 kg de nitrogen tractat cada dia per cada m<sup>2</sup> de biofilm. Un cop calculada la superfície del biofilm i considerant que per cada m<sup>3</sup> de reactor són necessaris 350m<sup>2</sup> (Roefs et al., 2017) , es pot obtenir el volum total de l'Oland.

Per tant, el següent càlcul en funció del nitrogen a l'influent és el següent:

$$CAPEX = V \cdot 1686 = \frac{BSF \cdot 1686 \frac{\text{€}}{\text{m}^3}}{350 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3}} = \frac{m_{inTN} \frac{\text{Kg NT}}{\text{dia}}}{0.015 \text{ kg} \frac{\text{NT}}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}}} \cdot \frac{1686}{350} = m_{inTN} \cdot 321,143 \quad (\text{Eq. 14})$$

$V$ : volum del reactor ( $\text{m}^3$ )

$m_{inTN}$ : cabal màssic de nitrògens totals del influent (kg NT /dia)

### OPEX:

Els valors típics per un tractament anammox, i en aquest cas l'Oland, ronden els 1,5-2,5 € per Kg de N tractat (Lozano i Muñoz et al., 2007), i com la despesa energètica pel reactor depèn de si és el tractament inicial o ve seguit del reactor UASB es decideix tenir en compte dos tipus d'OPEX. El primer cas és el que els influents d'aigües negres es tracten directament a l'Oland. Per tant, el preu d'Opex és de 2,5 €/kg N, mentre que en el segon cas si li segueix al reactor UASB i no és necessari aportar energia a l'influent, ja que les condicions de sortida del UASB són suficients es considera un Opex de 1,5 €/kg N (Garrido-Baserba et al., 2018, 2022).

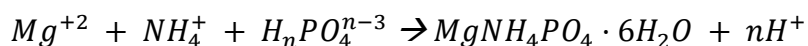
Tots aquests costos són paràmetres que el programa de GAMS té en compte a l'hora de fer l'optimització del conjunt del model.

## **REACTOR D'ESTRUVITA**

El sobrenedant de l'influent que prové de l'etapa 1 encara conté una alta concentració de nutrients que poden ser recuperats. Per aquest motiu es vol tractar l'efluent de la primera etapa en un reactor d'estruvita, tot aconseguint la seva cristal·lització.

L'estruvita és un mineral cristal·lí que requereix un procés de cristal·lització. La seva cristal·lització té l'avantatge que elimina els  $\text{P-PO}_4^{3-}$  i els  $\text{N-NH}_4^+$  i produeix estruvita ( $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) que pot ser utilitzada com a fertilitzant. És un fertilitzant que presenta molts avantatges respecta als convencionals, ja que té una baixa velocitat d'alliberament de substàncies nutritives la qual permet la bona absorció dels nutrients per part de la planta sense danyar el seu creixement, i així evitar possibles contaminacions a les aigües subterrànies (Tarragó et al., 2016).

La reacció de la precipitació de l'estruvita és:



La cristal·lització de l'estruvita requereix suficient  $Mg^{2+}$ ,  $PO_4^{3-}$ ,  $NH_4^+$  i una solució bàsica del voltant d'un pH de 8 i 11 (De Graaff et al., 2011; Larsen et al., 2015). Segons el pH de l'influent a tractar, les condicions de sobresaturació requerides seran majors o menors (De Graaff et al., 2011).

En la formació de l'estruvita trobem dues fases:

-Nucleació: És la fase on s'inicia el cristall i condiona el caràcter del creixement de la cristal·lització. És una fase important, ja que, segons la velocitat de caiguda de les partícules, el temps de creixement és menor o major. Aquest temps determina el diàmetre i la densitat d'aquestes partícules a través del fluid. Aquest fet es regeix per la Llei de Stokes i els fonaments de la sedimentació (McCabe et al., 1993).

-Creixement: És la segona fase que parteix quan el nucli està en una solució sobresaturada i comença a créixer. La mida del cristall incrementa amb el temps, la qual cosa s'ha de tenir en compte a l'hora de controlar la formació de l'estruvita. És una part molt important perquè, com major sigui la mida de la partícula, major és l'efecte en el creixement de les plantes si s'utilitza com a fertilitzant (Tarragó et al., 2016).

Per aconseguir aquesta precipitació es s'ha de determinar quin és el reactiu a afegir per aconseguir la precipitació. Per exemple, De Graaff et al., (2011) van obtenir la recuperació del P afegint NaOH i  $MgCl_2$ . En l'estudi de Li et al. (2022) van fer servir la pedra serpentina i, en altres casos com l'estudi de Garrido-Baserba et al. (2018, 2022), es va utilitzar  $Mg(OH)_2$ . En aquest estudi, es fa servir el reactiu de  $Mg(OH)_2$ , el qual ha de tenir una relació molar d'1,5 mols de  $Mg^{2+}$  per cada mol de  $PO_4^{3-}$ , per tal d'assegurar les condicions de sobresaturació amb un pH de 8 i aconseguir un grau de conversió del 90% (de Graaff, Temmink, Zeeman, & Buisman, 2011).

Com que en aquest estudi es contempen possibles escenaris descentralitzats i semicentralitzats, es segueix la mateixa metodologia emprada per Garrido-Baserba et al. (2018), la qual consisteix a utilitzar un reactor d'una única secció i un sedimentador a l'efluent que permeti la recirculació de nuclis ja existents i així, afavorir a la nucleació.

---

Pel que respecte a la composició del NT i TP a l'efluent els seus valors es calculen a partir de la reacció estequiomètrica esmentada anteriorment. Primer, és necessari determinar quin és el reactiu limitant tenint en compte les masses de l'influent i sabent que en aquest punt el 72% del fòsfor total és fosfat (de Graaff, Temmink, Zeeman, & Buisman, 2011):

$$m_{in_{NH_4^+}} \cdot \frac{gr NH_4^+}{dia} \cdot \frac{1 mol NH_4^+}{14 gr NH_4^+} = m_{in_{NH_4^+}} \left[ \frac{gr}{dia} \right] \cdot 0,0714 \left[ \frac{mol}{gr} \right]$$

$$m_{in_{TP}} \cdot \frac{72 gr P}{100 gr P-PO_4^{-3}} \cdot \frac{gr P-PO_4^{-3}}{dia} \cdot \frac{1 mol P-PO_4^{-3}}{30,97 gr P-PO_4^{-3}} \cdot \frac{1 mol PO_4^{-3}}{1 mol P-PO_4^{-3}} = m_{in_{PO_4^{-3}}} \cdot 0,0232 \quad (Eq.15)$$

$m_{in_{PO_4^{-3}}}$ : cabal màssic de fosfat

Tots dos depenen de la massa d'entrada de cada component, però si tots dos tinguessin la mateixa massa d'entrada, el reactiu limitant seria el fosfat. Segons la Taula 14 la relació d'amoni i fòsfor a l'inici és de 6,9 en les aigües negres i de 3,6 en les aigües marrons amb el 15% de les aigües grogues que no és recuperada. Per tant, ja que el reactor d'estruvita es troba en l'etapa 2 de la configuració que es vol optimitzar. En l'etapa 1, que és predecessora, hi ha la possibilitat d'utilitzar una configuració de només l'ús del tractament UASB o OLAND o UASB i OLAND. En tots els casos de l'etapa 1 l'eliminació de l'amoni no és suficient per fer que la massa d'entrada de fosfat a l'estruvita sigui suficientment superior a la de l'amoni. Per aquest motiu, el fosfat sempre és el reactiu limitant d'aquestes configuracions. A continuació es procedeix al càlcul de la massa de NT, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> i TP a l'efluent.

$$m_{in_{PO_4^{-3}}} \cdot 0,0232 \frac{mol}{dia} \cdot \frac{0,9 mol PO_4^{-3} reaccionats}{1 mol PO_4^{-3}} = m_{in_{PO_4^{-3}}} \cdot 0,0209 \left[ \frac{mol PO_4^{-3} reaccionats}{dia} \right] = \frac{mol NH_4^+ reaccionats}{dia} \quad (Eq.16)$$

$$m_{out_{NH_4^+}} = \left( m_{in_{NH_4^+}} \cdot 0,0714 \frac{mols NH_4^+}{dia} - \frac{mol NH_4^+ reaccionats}{dia} \right) \cdot \frac{14 gr N-NH_4^+}{1 mol N-NH_4^+} \quad (Eq.17)$$

$$m_{out_{NH_4^+}} = (m_{in_{NH_4^+}} \cdot 0,0714 - m_{in_{PO_4^{-3}}} \cdot 0,0209) \cdot 14 \left[ \frac{gr N-NH_4^+}{dia} \right] \quad (Eq.18)$$

$$m_{out_{PO_4^{-3}}} = m_{in_{PO_4^{-3}}} - \left( m_{in_{PO_4^{-3}}} \cdot 0,0209 \left[ \frac{\text{mol } PO_4^{-3} \text{ reaccionats}}{\text{dia}} \right] \cdot 30,97 \frac{\text{gr } PO_4^{-3}}{\text{mol } PO_4^{-3}} \right) =$$

$$m_{in_{PO_4^{-3}}} (1 - 0,647) = m_{in_{PO_4^{-3}}} \cdot 0,353 \quad (\text{Eq.19})$$

Al reduir la massa de l'amoni també es redueix la massa dels nitrògens totals.

$$m_{out_{TN}} = m_{in_{TN}} - \left( m_{in_{NH_4^+}} - m_{out_{NH_4^+}} \right) \quad (\text{Eq.20})$$

El fòsfor total eliminat prové del fosfat consumit.

$$m_{out_{TP}} = m_{in_{TP}} - \left( m_{in_{TP}} \cdot 0,72 - m_{out_{PO_4^{-3}}} \right) \quad (\text{Eq.21})$$

### Costos associats:

#### CAPEX:

Segons (Etter et al., 2011), el Capex es pot dividir en dues parts. La primera és la dels costos associats al tanc i la dels accessoris, els quals fan un total de 1,295 €/m<sup>3</sup> del reactor, el qual també s'assumeix aquest preu pel decantador que acompanya al reactor d'estruvita.

Per poder calcular el volum del reactor és necessari definir un HRT, en aquest treball es defineix un HRT de 3,5 hores com l'estudi de (Tarragó et al., 2016).

$$V_{re} = Q_{in} \cdot 3,5 \text{ h} \cdot \frac{1 \text{ dia}}{24 \text{ h}} = Q_{in} \cdot 0,1458 \quad (\text{Eq. 22})$$

$V_{re}$ : volum del reactor (m<sup>3</sup>)                       $Q_{in}$ : cabal de l'influent (m<sup>3</sup>/dia)

El volum es deixa en funció del cabal d'entrada, ja que el seu valor varia segons l'origen de l'inodor i el tractament que s'utilitzi.

Per calcular el volum del decantador s'assumeix un HRT d'una hora com l'estudi de (Garrido-Baserba et al., 2018).

$$V_{dec} = Q_{in} \cdot 1 \text{ h} \cdot \frac{1 \text{ dia}}{24 \text{ h}} = Q_{in} \cdot 0,0417 \text{ m}^3 \quad (\text{Eq. 23})$$

$V_{dec}$ : volum del reactor (m<sup>3</sup>)                       $Q_{in}$ : cabal de l'influent (m<sup>3</sup>/dia)

Per tant el Capex s'expressa com a continuació:

$$CAPEX = 1,295 \cdot (Q_{in} \cdot 0,1458 + Q_{in} \cdot 0,0417) \quad (\text{Eq. 24})$$

$Q_{in}$ : cabal de l'influent (m<sup>3</sup>/dia)



OPEX:

Pel que respecta als costos de l'Opex es considera el consum d'hidròxid de magnesi i l'electricitat.

Hidròxid de magnesi:

El consum d'hidròxid de magnesi depèn de la relació molar on per cada mol de  $\text{PO}_4^{3-}$  es necessiten 1,5 mols de  $\text{Mg}^{2+}$ , sabent que el pes molecular del  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  és de 58,32 gr/mol i considerant un grau de conversió és de 0,9 de la reacció de fosfat a estruvita. I tenint en compte que el 72% dels fòsfors totals són fosfats i que el preu d'hidròxid de magnesi és de 0,2525 €/kg de  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  (Garrido-Baserba et al., 2018). Amb totes aquestes dades es pot obtenir l'Opex.

$$\text{Opex}_{\text{Mg}(\text{OH})_2} = \frac{m_{\text{inTP}} \cdot 0,72 \cdot 1,5 \cdot 58,32 \cdot 365 \cdot 0,2525}{30,97 \cdot 1000} = m_{\text{inTP}} \cdot 0,267 \quad (\text{Eq.25})$$

$m_{\text{inTP}}$ : cabal màssic de fòsfor total a l'influent (gr/dia)

Electricitat:

Segons l'empresa Ostara, és de 2,2 kWh per cada Kg de fòsfor recuperat. I tenint en compte que el preu de l'electricitat en el moment de realitzar aquests càlculs és de 0,30 €/kWh.

$$\text{Opex}_{\text{elec.}} = \frac{m_{\text{inTP}} \cdot 2,2 \cdot 365 \cdot 0,72 \cdot 0,9 \cdot 0,3}{1000} = m_{\text{inTP}} \cdot 0,156 \quad (\text{Eq.26})$$

$m_{\text{inTP}}$ : cabal màssic de fòsfor total a l'influent (gr/dia)

Per tant, l'Opex s'expressa com a continuació:

$$\text{OPEX} = m_{\text{inTP}} \cdot (0,267 + 0,156) \quad (\text{Eq. 27})$$

$m_{\text{inTP}}$ : cabal màssic de fòsfor total a l'influent (gr/dia)

Ingressos associats:

Els beneficis associats per l'ús del reactor d'estruvita és la venda del fertilitzant d'estruvita, aquest benefici es pot aproximar a 0,36 €/kg d'estruvita (Etter et al., 2011).

$$\frac{\text{beneficis}}{\text{any}} = m_{\text{in}_{\text{PO}_4^{-3}}} \cdot 0,0209 \frac{\text{mol PO}_4^{-3} \text{ reaccionats}}{\text{dia}} \cdot \frac{1 \text{ mol estruvita}}{1 \text{ mol PO}_4^{-3} \text{ reaccionat}}$$

$$\cdot \frac{245,3 \text{ gr estruvita}}{1 \text{ mol estruvita}} \cdot \frac{0,00036\text{€}}{\text{gr estruvita}} \cdot \frac{365 \text{ dies}}{1 \text{ any}} = m_{\text{in}_{\text{PO}_4^{-3}}} \cdot 0,6737 \text{ €/any}$$

$$\text{Benefici} = m_{\text{in}_{\text{PO}_4^{-3}}} \cdot 0,6737 \quad (\text{Eq. 28})$$

Benefici: Beneficis associat a la venda d'estruvita (€/any)

$m_{\text{in}_{\text{PO}_4^{-3}}}$ : Cabal màssic de fosfat a l'influent (gr/dia)

Tots aquests beneficis i costos són paràmetres que el programa de GAMS té en compte a l'hora de fer l'optimització del conjunt del model.

### 7.3.2 Tractament per les aigües grogues

Per tractar aquestes aigües en la proposta que es fa per modelitzar els tractaments se segueix la següent seqüència, basada en les configuracions dutes a terme per Gritti, M. (2018) i Remy (2010). Cal remarcar que aquest tractament es contempla fer de manera descentralitzada total, ja que l'estabilització de les aigües grogues i el cost d'alguns tractaments com el MABR és millor fer-ho in situ.

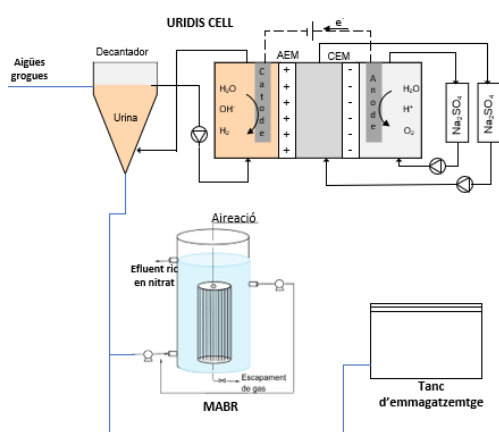
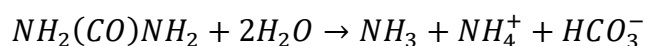


Figura 28. Configuració pel tractament d'aigües grogues

#### URIDIS CELL

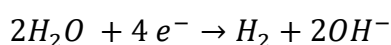
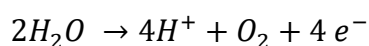
El component més gran que conté l'orina és la urea ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ), que s'hidrolitza molt ràpidament a amoni i bicarbonat a causa del bacteri *Ureasa* que sol ser freqüentment la responsable d'aquesta degradació (Mobley & Hausinger, 1989; Udert et al., 2003).



Aquesta hidròlisi comporta la volatilització de l'amoni i, com a resultat, se n'obté una orina amb menor concentració de N respecte a l'inici, tot causant danys mediambientals i de salut (Coppens et al., 2016; Udert et al., 2006).

A causa dels problemes ocasionats per la hidròlisi de la urea, és necessari aplicar mètodes per estabilitzar les aigües grogues, el més aviat possible. abans de fer algun tractament o aplicar-les com a fertilitzant. En aquest estudi es preveu fer l'estabilització un cop hagi sortit l'aigua groga del WC.

L'alternativa que segueix aquest estudi per evitar la hidròlisi de la urea és incrementar el pH amb una cel·la electroquímica (Uridis cell, d'ara endavant) acoblada amb un cristal·litzador, i així aconseguir la seva alcalinitat. Aquesta cel·la està composta per un ànode i un càtode que es troben separats per una membrana d'intercanvi de ions (IEM, ion-exchange membrane). Una pila electroquímica permet l'oxidació de l'aigua a l'ànode en gas  $O_2$  i protons  $H^+$ , que disminueix el pH en absència de tampó, mentre que hi ha una reducció de l'aigua al càtode amb  $H_2$  i formació d'ions hidroxils que fan augmentar el pH.



Aquest increment de pH, a part de reduir la càrrega patogènica que es pot trobar en l'orina, també permet recuperar fosfats en forma d'estruvita. Aquests fosfats se separen de l'orina, malgrat que la seva precipitació sol estar limitada per la concentració de calci o magnesi (Randall et al., 2016; Udert et al., 2003, 2006).

### Costos associats:

#### CAPEX:

Segons l'estudi fet per Gritti, M. (2018) sobre l'ús d'un Uridis cell per a l'estabilització de l'orina, se n'ha obtingut el següent CAPEX, en funció de les persones:

$$CAPEX = 153,6 \cdot persona \quad (\text{Eq. 29})$$

OPEX:

Segons l'estudi fet per Gritti, M. (2018), l'OPEX es pot expressar en funció de les persones:

$$OPEX = 210 \cdot persona \quad (\text{Eq. 30})$$

Ingressos associats:

Els ingressos associats per la venda del fertilitzant d'estruvita es pot aproximar a 0,36 €/kg d'estruvita (Etter et al., 2011).

Tots aquests beneficis i costos són paràmetres que el programa de GAMS té en compte a l'hora de fer l'optimització del conjunt del model.

## **STORAGE**

Un dels possibles tractaments per fer amb l'orina, un cop s'hagi estabilitzat, és emmagatzemar-la, com es va fer en un estudi suís. Aquest va fer servir l'orina de fertilitzant, la qual no va ser tractada després d'un llarg període d'emmagatzematge. Els resultats van permetre constatar que els contaminants eren d'un baix risc pels consumidors i pel medi ambient (Johansson et al., 2001). Tanmateix, es va concloure que era necessari fer més estudis al respecte. En aquest estudi es té en compte l'emmagatzematge de l'orina per un període de 7 mesos a una temperatura constant per aconseguir l'extinció dels bacteris patògens (Höglund, 2001) . Finalment, per a la seva aplicació és necessari diluir l'orina amb aigua amb una proporció de 1:1, amb l'objectiu de minimitzar la pèrdua potencial de NT en la seva aplicació.

Costos associats:

CAPEX:

Segons Garrido-Baserba et al. (2022) és possible establir els costos en funció del volum a emmagatzemar.

$$Capex = 785 \cdot V^{0,444} \quad (\text{Eq. 31})$$

$V$ : volum d'emmagatzematge ( $m^3$ )

#### OPEX:

Els costos associats a l'emmagatzematge, conservació de l'orina i dilució provenen de l'estudi de Remy, C. (2010) que són: 0,08 kWh/ $m^3$  pel bombament i energia demandada pel tanc, i per a la dilució de l'orina s'assumeix un consum de 0,1 kWh/ $m^3$ .

$$Opex = 0,3 \cdot (0,08 + 0,1) \cdot V \quad (\text{Eq. 32})$$

$V$ : volum d'emmagatzematge ( $m^3$ )

#### Ingressos associats:

Els beneficis provinents de la venda de l'orina diluïda es quantifiquen a un preu de 3,10 €/ $m^3$  (Gritti, M. 2018).

Tots aquests beneficis i costos són paràmetres que el programa de GAMS té en compte a l'hora de fer l'optimització del conjunt del model.

## **Membrane Aerated Bioreactor (MABR)**

Aquest reactor és una variació del MBR, es diferencia perquè conté una membrana enrotllada en forma d'espiral airejada que permet dur a terme la nitrificació i desnitrificació alhora. La nitrificació es du a terme a la zona rica en oxigen en el biofilm de la membrana, mentre que la desnitrificació es du a terme en la regió anòxica líquida del biofilm on la concentració de DQO és alta (Casey et al., 2008).

En un inici aquesta tecnologia servia per tractar el conjunt de totes les aigües residuals obtenint bons resultats, després es van començar a fer estudis amb aquesta tecnologia per tractar les aigües negres o les aigües grogues. En aquest cas, pel tractament de les aigües grogues la tecnologia ajuda al procés de la nitrificació i així poder aconseguir un efluent ric en nitrat que finalment podria ser comercialitzat com a fertilitzant. Per aconseguir aquesta nitrificació i evitar la

---

desnitrificació s'ha de treballar amb cabals d'aire baixos o a una baixa relació de DQO/TN, per aquest motiu en aquest treball, per no haver d'alterar la composició de la relació de l'influent del bioreactor, s'opta pel treball a cabals d'aire baixos.

Per altra banda, el pH del bioreactor té un paper important per a la nitrificació, el pH per a una bona nitrificació ha d'oscil·lar entre 7,2 a 8 (Gritti, M. 2018), encara que s'ha trobat que a baixos rangs com 6,2 i 7 també s'assoleix una nitrificació completa (Udert & Wächter, 2012). Per tenir aquest control es decideix seguir el mètode emprat per (Gritti, M. 2018) on utilitza una cel·la electroquímica, ja que l'ús de productes químics com a controlador de pH és costós fent que el procés sigui més complex i propens al mal funcionalment (Udert & Wächter, 2012).

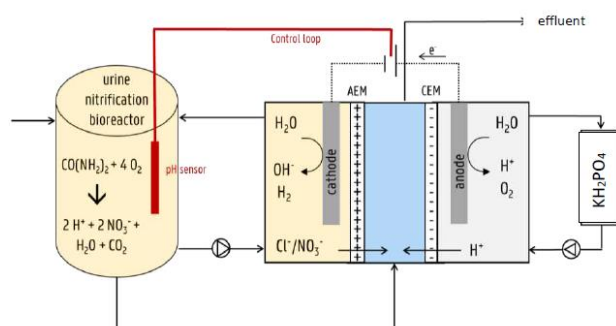


Figura 29. Esquema de MABR amb control de pH de cel·la electroquímica. Font: (Gritti, 2018)

En aquest treball es considera un pH de 7,5 amb un HRT de 7,1 dies i així obtenir les següents eficiències d'eliminació obtingudes de la literatura de (Gritti, M. 2018):

Taula 19. Percentatges d'eliminació al MABR

	Percentatge eliminat (%)
DQO	88
DBO	88
N-NH <sub>4</sub>	97

Costos associats:

CAPEX:

Segons l'estudi fet per Gritti, M. (2018) sobre l'ús d'un MABR per la nitrificació de l'orina s'ha obtingut el següent Capex que es pot representar en funció de les persones:

$$CAPEX = 1.329,34 \cdot persona \quad (\text{Eq. 33})$$

OPEX:

Segons l'estudi fet per Gritti, M. (2018) de l'ús d'un MABR per a la nitrificació de l'orina, s'ha obtingut el següent Opex que es pot representar en funció de les persones:

$$OPEX = 75 \cdot persona \quad (\text{Eq. 34})$$

Ingressos associats:

Pel que respecte als beneficis que es poden extreure de la venda de l'efluent ric en nitrats com a fertilitzant líquid, quantifiquen a un preu de 3,38 €/m<sup>3</sup> (Gritti, M. 2018).

Tots aquests beneficis i costos són paràmetres que el programa de GAMS té en compte a l'hora de fer l'optimització del conjunt del model.

### 7.3.3 Etapa 3: tractament per les aigües grises + negres

Per tractar aquestes aigües en la proposta que es fa per modelitzar els tractaments se segueix la següent seqüència:

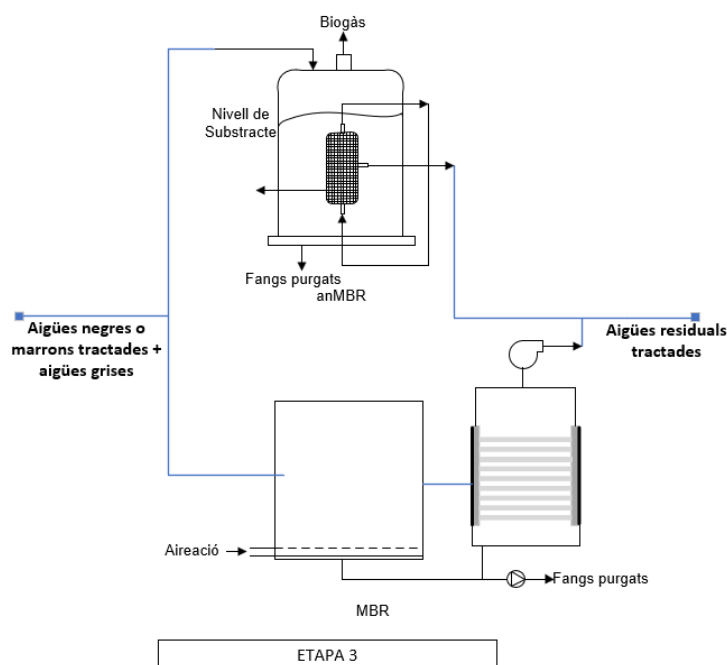


Figura 30. Configuració proposada pel tractament de l'etapa 3

### Membrane BioReactor (MBR)

Un bioreactor de membrana permet tractar les aigües grises amb una combinació biològica convencional i una ultrafiltració alhora, aquesta combinació proporciona un nivell avançat d'eliminació de sòlids orgànics i en suspensió. En aquest tractament es distingeixen dos parts: la primera és el bioreactor airejat on es troba l'aigua amb el cultiu bacterià que degrada la matèria orgànica, i la segona part és on es troba la membrana que s'encarrega de la separació sòlid-líquid.

Per calcular el temps de retenció d'aquest reactor s'utilitza els paràmetres de disseny de la literatura i la següent equació (R. Liu et al., 2005; Xing et al., 2003):

$$HRT = \frac{(C_{in_{DBO}} - C_{out_{DBO}})}{k_e X * m_{out_{DBO}}} \quad (\text{Eq. 35})$$



On  $k_e$  és el grau de degradació del substrat que es considera de  $2,6 \cdot 10^{-3}$  dies<sup>-1</sup>, i  $X$  és la concentració dels fangs al tanc d'aeració que és considera de 13000 mg/L. Aquesta En aquest cas, el HRT depèn de la concentració de DQO a l'influent el qual depèn de si es tracten aigües grises amb negres o marrons tractades amb un lavabo al buit o convencional. Per tant, el HRT no es pot determinar fins que no se sàpiga quina és la configuració més adient des de la perspectiva econòmica.

A continuació, es presenten els percentatges d'eliminació referits a massa que es consideren en l'estudi de Garrido-Baserba et al. (2022) i Xing et al., 2003:

Taula 20. Percentatge d'eliminació de contaminants al MBR

	Percentatge eliminat (%)
DQO	97
DBO	95,80
NT	73
N-NH <sub>4</sub>	94
N-NO <sub>3</sub>	39
PT	80
SST	99
SSV	99

Pel que respecta al càlcul del cabal de l'efluent del MBR s'ha optat per considerar que un 2,2% del cabal és purgat (Garrido-Baserba et al. 2022).

### Costos associats:

#### CAPEX:

Segons els valors econòmics calculats per Lo et al. (2015) i, tenint en compte tots els materials que hi intervenen (les bombes, les addicions químiques, el tanc dels fangs generats, etc), es va arribar a la inversió següent:

$$Capex = 1060 \cdot Q_{in}^{0,872} \quad (\text{Eq. 36})$$

$Q_{in}$ : cabal de l'influent del MBR (m<sup>3</sup>/dia)

### OPEX:

Segons els valors econòmics calculats per Lo et al. (2015) i, tenint en compte tots els materials que hi intervenen (les bombes, les addicions químiques, el tanc dels fangs generats, etc.) es va arribar a la inversió següent:

$$Opex = (-0,0509 \cdot \ln(Q_{in}) + 0,664) \cdot 365 \cdot Q_{in} \quad (\text{Eq. 37})$$

$Q_{in}$ : cabal de l'influent del MBR (m<sup>3</sup>/dia)

Tots aquests costos són paràmetres que el programa de GAMS té en compte a l'hora de fer l'optimització del conjunt del model.

### **AnMBR (Anaerobic membrane bioreactor)**

En aquest tractament és possible una recuperació energètica a causa del tractament anaerobi que ajuda a obtenir metà del tractament de la matèria orgànica present a les aigües.

Aquest tractament no necessita gaire energia, però requereix un gran cost capital i d'un manteniment d'operació elevat (Martin et al., 2011; Young et al., 2012). El anMBR és un reactor que no només recupera energia del tractament d'aigües residuals, sinó que també pot produir una aigua que es pot reciclar (Cashman et al., 2017).

En aquest procés es va considerar un HRT de 8 hores ja que segons la literatura és el més freqüent per aconseguir uns resultats d'eliminació de DQO (Gouveia et al., 2015; Ho & Sung, 2009; Martin et al., 2011; Smith et al., 2013). L'obtenció del biogàs d'aquest procés és de 0,24 L CH<sub>4</sub>/g DQO a 25 °C i de 0,27 L CH<sub>4</sub>/g DQO a 35 °C (Martinez-Sosa et al., 2011).

A continuació, es presenten els percentatges d'eliminació referits a massa que es consideren en l'estudi de Garrido-Baserba et al. (2022):

	Percentatge eliminat (%)
DQO	97
DBO	95,80
NT	61,5
N-NH <sub>4</sub>	17,3
PT	45,39
SST	99
SSV	99

Pel que respecta al càlcul del cabal de l'efluent de l'anMBR s'ha optat per considerar que un 2,2% del cabal és purgat (Garrido-Baserba et al. 2022).

#### Obtenció biogàs:

Per cada gram de DQO eliminat, s'aconsegueixen 0,24 litres de metà en condicions estàndards i el biogàs aconseguit conté un 78% de metà (De Graaff, et al., 2010; Martin et al., 2011; Metcalf & Eddy, 2014).

Pel càlcul de l'obtenció del biogàs es segueix el mateix procediment que l'explicat en l'apartat d'obtenció de biogàs de l' UASB que es troba a l'apartat 7.3.1.

Aquesta dada pot ser modificada en funció de la DQO de l'influent, perquè el seu valor varia segons la càrrega màssica a l'influent.

En aquest treball no es contempla l'ús del biogàs com a possible recurs de combustible per a l'obtenció d'energia necessària de treball del reactor, ja que seria necessari un tractament entremig per poder purificar el biogàs i obtenir un bon rendiment de la seva cremada. Per aquest motiu, es decideix optar per la venda del biogàs i pagar l'energia elèctrica demandada.

Aquesta energia que s'ha d'aportar depèn del cabal tractat, per tant, s'ha de regular en funció d'aquest.

Costos associats:

CAPEX:

Segons Garrido-Baserba et al. (2022) s'aconsegueix representar una funció de costos respecte a l'influent tractat. Mitjançant la següent funció:

$$Capex = 5113,6 \cdot Q_{in}^{0,2684} \quad (\text{Eq. 38})$$

$Q_{in}$ : cabal de l'influent de l'anMBR (m<sup>3</sup>/dia)

OPEX:

L'opex és calculat assumint que el cost de tractament al dia és de 0,06 €/m<sup>3</sup> i l'energia necessària a aportar és de 0,49 kWh/m<sup>3</sup> considerant que el preu d'electricitat en el moment de realitzar aquests càlculs és de 0,3 €/kWh (Lema & Suarez, 2017; Pretel et al., 2014).

Ingressos associats:

Els beneficis associats per l'ús d'aquest reactor és la venda del biogàs no purificat, la seva venda pot aportar uns beneficis de 0,126 €/m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> en condicions normals (Deng & Hägg, 2010). Per calcular els beneficis associats segueix el mateix procediment que l'explicat a l'apartat del UASB, tot quedant com a resultat la següent equació.

$$Beneficis = m_{inDQO} \cdot 8,00226 \cdot 10^{-3} \quad (\text{Eq. 39})$$

$m_{inDQO}$ : cabal màssic de DQO del influent de l'anMBR (m<sup>3</sup>/dia)

*Beneficis*: beneficis associats de la venda de metà (€/any)

Aquesta dada es deixa en funció de la DQO a l'influent, ja que el seu valor varia segons si es tracta aigües negres totals o aigües marrons amb el residu d'aigües grogues.

Tots aquests beneficis i costos són paràmetres que el programa de GAMS té en compte a l'hora de fer l'optimització del conjunt del model.

---

### 7.3.4 Etapa 4: Reverse Osmosi (RO)

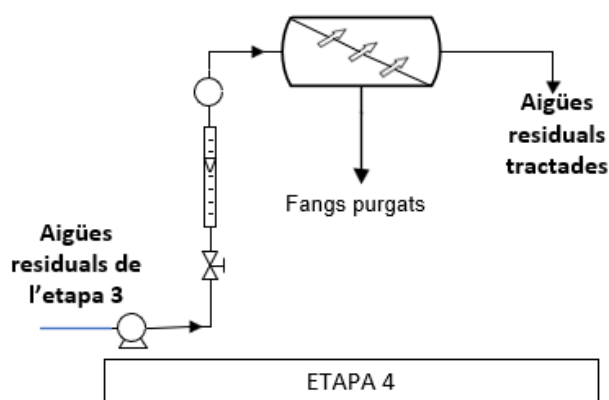


Figura 31. Configuració proposada pel tractament de l'etapa 4

L'ús d'una osmosi inversa (RO, endavant) s'ha considerat un bon tractament per la seva eficiència i baix cost econòmic (del Pino & Durham, 1999; Garrido-Baserba et al., 2022; Reith & Birkenhead, 1998). Segons els estudis pilot fets per (Tam et al., 2007) sobre la resolució d'utilitzar un RO en l'etapa final del tractament d'aigües residuals, es va observar que els nivells de la majoria dels contaminants van ser molt baixos en les aigües efluents que es podria reciclar, fins i tot va aconseguir eliminar d'aquestes aigües alguns virus i E. Coli.

A continuació, a la Taula 21 es mostra el percentatge d'eliminació de contaminants.

Taula 21. Percentatge d'eliminació de contaminants del RO

	% eliminació	Referència
DQO	91,6	(Davood Abadi Farahani et al., 2016)
DBO	90	(M. Liu et al., 2011)
TN	65,91	(Garrido-Baserba et al., 2022)
N-NH4+	85	(van Voorthuizen et al., 2005)
N-NO3	76,5	(van Voorthuizen et al., 2005)
TP	97	(van Voorthuizen et al., 2005)
TSS	99	(Davood Abadi Farahani et al., 2016)
VSS	99	(Garrido-Baserba et al., 2022)

Pel que respecta al càlcul del cabal de l'efluent del RO s'ha optat per considerar que un 15% del cabal és purgat.

Costos associats:

CAPEX:

Per calcular els costos d'inversió i tenir en compte l'economia d'escala es va fer una recerca per relacionar el cabal a tractar amb el cost, el qual es pot trobar els càlculs als annexos, del qual es va obtenir la següent funció:

$$Capex = 2672,9 \cdot Q_{in}^{0,5011} \quad (\text{Eq. 40})$$

$Q_{in}$ : cabal volumètric de l'influent del RO (m<sup>3</sup>/dia)

Aquest cabal depèn de la quantitat de cabal d'aigua es tracti, i això depèn de la gestió que es faci segons els agrupaments d'habitatges.

OPEX:

Els costos operacionals es van estimar de 0,17 €/m<sup>3</sup> (Garrido-Baserba et al., 2022).

### 7.3.5 Etapa 5: Ultra violeta (UV)

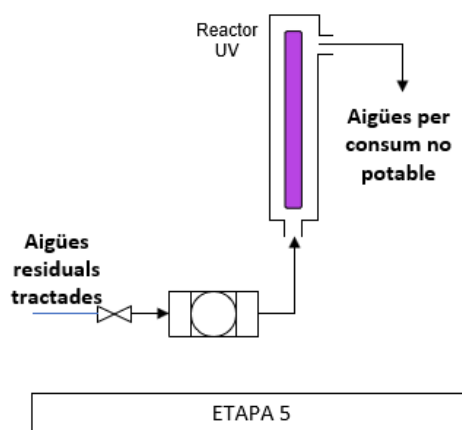


Figura 32. Configuració proposada pel tractament final de les aigües per consum no potable

L'ús de l'ultraviolat és important perquè s'ha comprovat que, mitjançant una combinació correcta, es pot aconseguir una desinfecció molt efectiva dels bacteris, protozous i virus. Així doncs, és necessari afegir un UV per acabar de confirmar que les aigües efluents del procés seran segures per a la interacció amb el medi abocat o per al consum humà (Metcalf & Eddy, 2014).

### Costos associats:

#### CAPEX:

Per calcular els costos d'inversió i tenir en compte l'economia d'escala es va fer una recerca per relacionar el cabal a tractar amb el cost del qual es va obtenir la següent funció que es troba explicat als annexes:

$$Capex = 54,891 \cdot Q_{in}^{0,6515} \quad (\text{Eq. 41})$$

$Q_{in}$ : cabal volumètric de l'influent del UV (m<sup>3</sup>/dia)

#### OPEX:

Els costos operacionals es van estimar per 0,16 €/m<sup>3</sup> (Mohamad Mazuki et al., 2020).

## **7.3.6 Tanc d'emmagatzematge**

Els tancs d'emmagatzematge serveixen per a aquella aigua que no es pugui subministrar directament. En aquest projecte es contemplen 2 tipus de tancs d'emmagatzematge. Un per a l'emmagatzematge de les aigües residuals tractades, que seran del volum de l'aigua restant que no s'utilitzi directament per consum no potable. I l'altre tanc per l'emmagatzematge de les aigües restants provinents de la precipitació que no s'han fet servir directament per a consum no potable.

Costos associats:

CAPEX:

La funció de costos respecte al volum emmagatzemat és:

$$Capex = 785 * V^{0,444} \quad (\text{Eq. 42})$$

$V$ : volum a emmagatzemar ( $m^3$ )

Tots aquests costos són paràmetres que el programa de GAMS té en compte a l'hora de fer l'optimització del conjunt del model.

## 7.3.7 Canalitzacions i bombaments

### CANALITZACIONS

Les canalitzacions són les unions que es troben en la xarxa de clavegueram que tenen la funció d'evacuar correctament les aigües residuals d'un habitatge fins a la seva corresponent planta de tractament. A continuació, s'explicaran els tipus de canalitzacions i quines operacions calen fer per calcular quants metres s'han d'utilitzar per a cada gestió i el seu cost associat.

Tipus de canalitzacions:

Les canalitzacions, segons (Roefs et al., 2017) poden ser de 3 tipus: per gravetat, per pressió i al buit. I el material del qual estan fabricats de 2 tipus: formigó no reforçat i polietilè d'alta densitat (HDPE).

**Gravetat:** L'aigua és evacuada per la força de gravetat perquè el sistema de clavegueram es troba soterrat. Aquest tipus de canalitzacions es fan servir per a les que es denominaran canonades d'aigües privades grises o grogues.

**Pressió:** És necessari impulsar l'aigua residual mitjançant un sistema de bombament per poder evacuar aquestes aigües. Aquest tipus de tractament és necessari quan totes les canalitzacions es troben en un mateix nivell i han de mobilitzar l'aigua fins a la planta de tractament. En aquest estudi, aquestes canonades seran les que connecten els diferents habitatges entre si.



El buit: Aquest sistema utilitza bombes al buit per evacuar les aigües residuals. Tanmateix, és necessari per expulsar les aigües negres o marrons a causa del seu alt contingut en matèria sòlida.

Formigó no reforçat: Aquest material només s'usa per a les canonades dels habitatges, és a dir, per a aquelles que evacuen a causa de l'efecte de la gravetat. Això és possible perquè el cabal a tractar és baix i no és necessari fer servir fibres per reforçar el formigó.

Polietilè d'alta densitat: S'utilitzen per a les canalitzacions de pressió i al buit, ja que és el més habitual d'utilitzar a causa de la seva rigidesa, tenacitat, resistència química i tèrmica, i sobretot, pel seu baix cost.

Per fer el càlcul dels metres de canonades s'han seguit els passos proposats de l'estudi de Maurer et al. (2010, 2013).

Aquest model simplificat es basa en la suma de les longituds de canonades a partir d'un model ortogonal que utilitza la superfície d'estudi i la seva densitat de població.

Per aquest motiu es diferencien les canonades privades de les públiques.

$$L_{S_{total}} = L_{S_{private}} + L_{S_{public}} \quad (\text{Eq. 43})$$

$L_{S_{total}}$ : llargària total de tots els claveguerams (m)

$L_{S_{private}}$ : llargària total del clavegueram privat (m)

$L_{S_{public}}$ : llargària total del clavegueram públic (m)

## CLAVEGUERAM PRIVAT

Les canonades del clavegueram privat (clavegueram específic de cada habitatge) són les canalitzacions que es troben dins d'un mateix habitatge i arriben fins a la canalització principal, on uneixen els habitatges (Maurer et al., 2010, 2013; Roefs et al., 2017).

A continuació, es procedeix a l'explicació del càlcul dels metres de canonades utilitzats segons la distribució de les cases i els costos associats.

---

### Metres de canonada

$$L_{S_{private}} = 0,5 \cdot A \cdot \sqrt{f_2 \cdot \rho} \quad (\text{Eq. 44})$$

$L_{S_{private}}$  : metres de canonada privada (m)

$A$  : és la superfície total de la zona d'estudi (m<sup>2</sup>)

$\rho$  : és la densitat d'habitatges de la zona d'estudi (cases/m<sup>2</sup>)

$f_2$  : paràmetre de la forma de l'edifici (-)

És necessari remarcar que el model de UWIM és sensible al paràmetre  $f_2$  (paràmetre de la forma de l'edifici) que varia segons el tipus d'edifici, per aquest motiu s'ha optat aplicar la dada de  $f_2 = 1,44$  per edificis tipus habitatges plurifamiliars i el valor de 2,29 pels edificis tipus habitatges unifamiliars resultats mitjans de l'estudi de Maurer et al. (2013). Pel que respecte al càlcul de la superfície total d'estudi ( $A$ ) és el conjunt d'habitatges, en el cas del projecte com se separa la gestió d'habitatges unifamiliars i plurifamiliars, aquesta dada és diferent per cada cas d'estudi, ja que la quantitat d'habitatges, i com a conseqüència la superfície d'ocupació, varia respecte a l'any i escenari d'estudi de projeccions de població. Per tant, aquestes dades es deixen en funció de les dades d'entrada de població, proporció edificis unifamiliars i plurifamiliars i superfície de cada habitatge.

### Costos associats:

#### CAPEX:

Pels càlculs de les canonades es prenen els descrits per (Roefs et al., 2017), on segons el tipus de canonades s'utilitzen unes fórmules pel càlcul del CAPEX/m o unes altres. Tot seguit, es multipliquen pels metres de canonades totals i es pot obtenir el Capex total.

$$CAPEX_{gravetat} = 130 \cdot 1,3^{\frac{\text{diàmetre}-300}{120}} \quad (\text{Eq. 45})$$

$$CAPEX_{buit} = \text{diàmetre} \cdot 0,59 \cdot 0,7 \cdot 1,1 \quad (\text{Eq. 46})$$

Per calcular el diàmetre de les canonades que transportin les aigües negres i marrons s'utilitza un diàmetre de 70 mm perquè tenen una alta càrrega de matèria per transportar a l'interior d'un habitatge, mentre que per transportar les aigües grogues al ser d'un menor volum i menys càrrega de matèria s'utilitza una canonada de 32 mm de diàmetre. Per altra banda, pel dimensionament del diàmetre de les canonades grises s'estima una mida de 110 mm perquè és el que transporta un cabal de major volum.

#### OPEX:

Pels càlculs de les canonades es prenen els descrits per (Roefs et al., 2017), en els quals, segons el tipus de canonades, s'utilitzen unes fórmules pel càlcul del OPEX/m. Tot seguit, es multipliquen pels metres totals de canonades i se n'obté l'OPEX total.

Per les canalitzacions on les aigües residuals circulen per gravetat, es pren un valor de 0,17 €/m·any. En les canalitzacions que es fan servir bombaments a pressió, ja que les aigües es troben pressuritzades i, per tant, tenen un cost d'operació més elevat, s'estima un cost de 1 €/m·any. En el cas de les canalitzacions al buit, els costos es consideraran d'1 €/m·any, ja que les canalitzacions d'aigües negres o marrons contenen una menor quantitat d'aigua, però una elevada concentració de sòlids, fet que comporta un elevat cost de neteja de les canalitzacions (Garrido-Baserba et al., 2018; Larsen et al., 2015; Roefs et al., 2017).

## **CLAVEGUERAM PÚBLIC**

Les canonades del clavegueram públic són les canalitzacions principals i les que uneixen les canonades privades amb les EDAR (Maurer et al., 2010, 2013; Roefs et al., 2017).

A continuació, es procedeix a l'explicació del càlcul dels metres de canonades utilitzats segons la distribució de les cases i els costos associats.

### Metres de canonada

$$L_{S_{public}} = \left( \sqrt{\frac{A}{f_1}} - \sqrt{\frac{1}{f_2 \cdot \rho}} \right) \cdot \sqrt{\frac{f_1 \cdot A \cdot \rho}{4 \cdot f_2}} + \sqrt{f_1 \cdot A} \quad (\text{Eq. 47})$$

$L_{S_{public}}$ : metres de canonada pública (m)

$A$  ( $m^2$ ): és la superfície total de la zona d'estudi.

$\rho$  ( $\frac{1}{m^2}$ ): és la densitat d'habitatges de la zona d'estudi

$f_2$  (-): paràmetre de la forma de l'edifici

$f_1$  (-): paràmetre de la forma de l'àrea d'estudi

Com a àrea de superfície d'estudi ( $A$ ) és la suma del conjunt dels habitatges dependent del conjunt d'habitatges que es faci. És a dir, la superfície d'estudi depèn de si el tractament es fa in situ (els quals no hi ha connexions de clavegueram públic), en un conjunt de 10 habitatges (per tant, es calcula els metres de connexió entre els 10 habitatges per arribar a un únic punt de tractament) o en un conjunt de 100 habitatges (on es calcula els metres de connexió entre els 100 habitatges fins al punt de tractament). Per altra banda, per calcular els metres de connexió entre una zona de tractament que gestiona els residus de 10 habitatges a un tractament de 100 habitatges, es suma la diferència de la connexió de 100 habitatges a una zona de tractament amb la connexió de 10 habitatges a una zona de tractament.

Finalment, cal esmentar que els paràmetres de  $f_2 = 1,44$  per habitatges plurifamiliars i el valor de 2,29 pels habitatges unifamiliars com s'ha considerat en el clavegueram privat. El paràmetre de la forma de l'àrea d'estudi ( $f_1$ ) es considera d'un valor de 2 com a resultat de l'estimació de la simulació de l'estudi de (Maurer et al., 2013).

### Costos associats:

#### CAPEX:

Pels càlculs de les canonades es prenen els descrits per (Roefs et al., 2017), en els quals, segons el tipus de canonades s'utilitzen unes fórmules pel càlcul del CAPEX/m o unes altres. Tot seguit, es multipliquen pels metres de canonades totals i se n'obté el Capex total.

$$CAPEX_{pressió}^{70-110mm} = diàmetre \cdot 0,51 \cdot 1,1 \quad (\text{Eq. 48})$$

$$CAPEX_{pressió}^{150-400mm} = diàmetre \cdot 0,61 \cdot 1,1 \quad (\text{Eq. 49})$$

*diàmetre: mm*

Per a dimensionar el diàmetre de les canonades que han de transportar les aigües negres i marrons, s'utilitza un diàmetre de 70 mm, ja que tenen una alta càrrega de matèria per transportar a entre el conjunt d'habitatges. Per altra banda, pel dimensionament del diàmetre de les canonades grises s'estima una mida de 200 mm perquè és el que transporta un cabal de major volum respecte al dos tipus d'aigües anteriors.

#### OPEX:

Per a les canalitzacions on les aigües residuals circulen per gravetat, es pren un valor de 0,17 €/m·any. En les canalitzacions que s'usen bombaments a pressió, pel fet que les aigües es troben pressuritzades, tenen un cost d'operació més elevat, s'estima un cost de 1 €/m·any. En les canalitzacions al buit, els costos es consideraran de 1 €/m·any, ja que les canalitzacions d'aigües negres o marrons contenen una menor quantitat d'aigua, però una elevada concentració de sòlids, fet que comporta un elevat cost de neteja de les canalitzacions (Garrido-Baserba et al., 2018; Larsen et al., 2015; Roefs et al., 2017).

## **BOMBAMENT**

Pel bombament de les aigües a través de les canonades, es poden diferenciar 3 tipus de bombaments. Els bombaments per a les aigües grises o els bombaments al buit per a les aigües negres i marrons. Tots aquests bombaments seran necessaris per al transport de les aigües residuals fins a la planta de tractament.

#### Costos associats:

A continuació, s'explica els tipus de bombaments i els costos associats que es tenen en compte en aquest estudi.

---

### CAPEX:

Pel càlcul dels Capex s'agafen les dades de Garrido-Baserba et al. (2022) adaptades de l'estudi fet per en Roefs et al. (2017) on no s'inclouen els costos de bombaments d'entrada a la depuradora.

$$CAPEX_{GW/YW/RW} = 33 \text{ €/persona} \quad (\text{Eq. 50})$$

$$CAPEX_{BW/BRW} = 326 \text{ €/persona} \quad (\text{Eq. 51})$$

### OPEX:

Pel càlcul dels Opex s'agafen les dades de (Garrido-Baserba et al., 2022) adaptades del l'estudi fet per en (Roefs et al., 2017) on no s'inclouen els costos de bombaments d'entrada a la depuradora.

$$OPEX_{GW/YW/RW} = 1.13 \text{ €/persona} \cdot \text{any} \quad (\text{Eq. 52})$$

$$OPEX_{BW/BRW} = 0,3 \cdot 19,68 \text{ €/persona} \cdot \text{any} \quad (\text{Eq. 53})$$

*GW*: aigües grises      *YW*: aigües grogues      *RW*: aigües recollides de pluja

*BW*: aigües negres      *BRW*: aigües marrons

Tots aquests costos de canalització i bombament són paràmetres que el programa de GAMS té en compte a l'hora de fer l'optimització del conjunt del model.

## **7.3.8 Reaprofitament d'aigües**

En aquest apartat s'explica com es pensa gestionar les aigües implementant la nova gestió proposada. En aquest cas, en aquesta gestió es diferencien dos tipus:

- L'aigua pel consum potable, el qual sorgeix del reaprofitament de les aigües recollides de la pluja.
- L'aigua pel consum no potable, el qual sorgeix del reaprofitament de les aigües residuals ja tractades.

## REAPROFITAMENT PER CONSUM NO POTABLE

El reaprofitament pel consum no potable prové de les aigües residuals que es tracten en l'última etapa de tractament que és el UV. Segons la configuració de tractaments que s'hagi triat la concentració final pot variar. Per aquest motiu, per assegurar una qualitat relativament bona per usos no potables, s'ha decidit dur a terme una configuració determinada per cada tipus d'aigües.

## REAPROFITAMENT PER CONSUM D'ÚS POTABLE

En aquest apartat s'explica el mètode que s'utilitza per a la recollida d'aigua i els tractaments que es duran a terme pel mateix consum humà on se segueix la següent seqüència basada en les configuracions dutes a terme per (Rabaey et al., 2020).

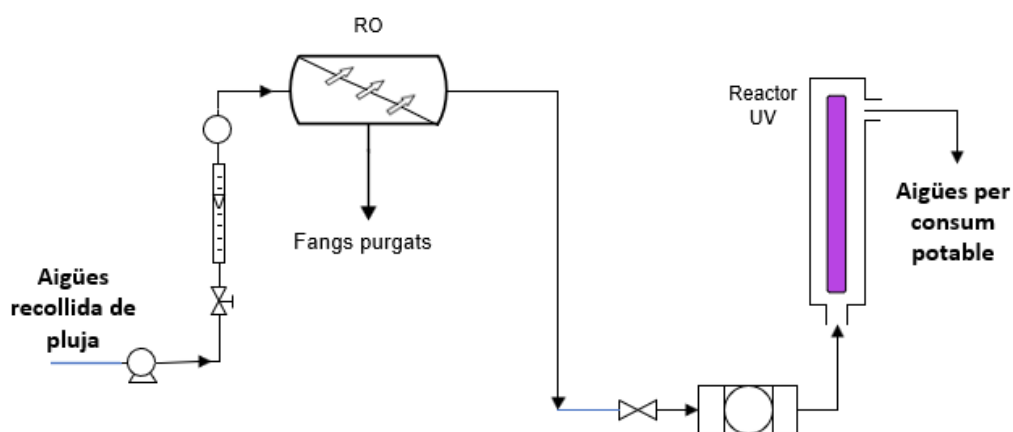


Figura 33. Configuració proposada pel tractament d'aigües de pluja

## QUANTITAT DE RECOL·LECCIÓ

La recollida es fa en funció de les pluges mensuals que puguin haver-hi o les que s'estimen al futur i l'àrea del sostre de cada habitatge. Tenint en compte que en la superfície de recollida hi ha un coeficient de captació del 90% (Angrill et al., 2012).

La pluja mensual es calcula segons els estudis actuals i futurs on s'aplica la reducció futura que s'han determinat en l'apartat 3.2. Per conèixer els càlculs amb deteniment consultar l'annex.

## GIRONA

### Habitatge unifamiliar

Taula 22. Precipitació i recollida d'aigua per un habitatge unifamiliar de Girona segons l'escenari 4.5 i 8.5

<b>HABITATGE UNIFAMILIAR</b>					
<b>RCP 4.5</b>			<b>RCP 8.5</b>		
Any	Precipitació [mm]	Aigua per reutilitzar per habitatge [m3]	Any	Precipitació [mm]	Aigua per reutilitzar per habitatge [m3]
2021			2021		
2030	442,05	20,71	2030	422,25	19,79
2050	410,15	19,22	2050	378,87	17,75

### Habitatge plurifamiliar

Taula 23. Precipitació i recollida d'aigua per un habitatge plurifamiliar de Girona segons l'escenari 4.5 i 8.5

<b>HABITATGE PLURIFAMILIAR</b>					
<b>RCP 4.5</b>			<b>RCP 8.5</b>		
Any	Precipitació [mm]	Aigua per reutilitzar per habitatge [m3]	Any	Precipitació [mm]	Aigua per reutilitzar per habitatge [m3]
2021			2021		
2030	750,70	104,68	2030	714,94	99,69
2050	695,93	97,04	2050	644,59	89,88

## TARRAGONA

### Habitatge unifamiliar

Taula 24. Precipitació i recollida d'aigua per un habitatge unifamiliar de Tarragona segons l'escenari 4.5 i 8.5

<b>HABITATGE UNIFAMILIAR</b>					
<b>RCP 4.5</b>			<b>RCP 8.5</b>		
Any	Precipitació [mm]	Aigua per reutilitzar [m3]	Any	Precipitació [mm]	Aigua per reutilitzar [m3]
2021			2021		
2030	442,05	20,71	2030	422,25	19,79
2050	410,15	19,22	2050	378,87	17,75



## Habitatge plurifamiliar

Taula 25. Precipitació i recollida d'aigua per un habitatge plurifamiliar de Tarragona segons l'escenari 4.5 i 8.5

<b>HABITATGE PLURIFAMILIAR</b>					
<b>RCP 4.5</b>			<b>RCP 8.5</b>		
Any	Precipitació [mm]	Aigua per reutilitzar [m3]	Any	Precipitació [mm]	Aigua per reutilitzar [m3]
2021			2021		
2030	750,70	104,68	2030	714,94	99,69
2050	695,93	97,04	2050	644,59	89,88

## TRACTAMENT DE L'AIGUA RECOL·LECTADA

Les aigües procedents de la precipitació necessiten ser tractades per un correcte consum humà i és necessari un tractament com l'osmosi inversa i un ultraviolat i assegurar la seva potabilització (Dirisu et al., 2019; Rabaey et al., 2020).

Segons la quantitat d'aigua recollida aquesta és enviada al tractament de RO, del qual un 15% de l'influent són aigües residuals els quals són expulsats al clavegueram d'aigües residuals perquè es tractin de manera centralitzada amb les altres aigües urbanes. L'altre 85% són aigües que s'utilitzen per al consum humà, que hauran de passar prèviament per a un tractament de UV. I finalment, les aigües que no es puguin utilitzar per consum potable directe, quedaran emmagatzemades en un tanc

Els costos associats segueixen les mateixes funcions descrites en l'apartat 7.3.4 pel RO, 7.3.5 pel UV i 7.3.6 pel tanc d'emmagatzematge.

Segons les necessitats de cada llar, es pot mineralitzar l'aigua de la pluja segons convingui, aquesta pràctica està molt utilitzada actualment. Es poden trobar preus en qualsevol distribuïdor a preus baixos, però també es troben ROs comercials que inclouen filtres de mineralització, mantenir el bon gust i el balanç de minerals (Garrido-Baserba et al., 2022).

## 8 Optimització de costos

### 8.1 Concepte d'optimització i programa gams

Primer de tot s'ha d'explicar el concepte d'optimització i modelització de processos.

La modelització d'un procés és replicar numèricament un sistema real tenint en compte les principals variables que afecten aquest sistema. Aquest model està format per un conjunt d'equacions independents que relacionen diverses variables mitjançant uns paràmetres.

La modelització de processos poden ser:

- Seqüencial-modular: Aquests tipus de modelització indica que un és la seqüència de l'altre i fins que no s'acaba de modelar un procés no es pot continuar amb el que li segueix.

- simultani-orientat a equacions: Per aquests tipus és necessari primer formular totes les equacions necessàries per construir el model, és a dir, dissenyar. Per fer-ho és necessari tenir un ampli coneixement del qual se simula i els paràmetres més important que l'afecten. Per altra banda, permet explotar sistemàticament totes les alternatives possibles segons com es programi.

En els models no es pot buscar aquells que siguin exhaustius, és a dir que necessitin replicar exactament la realitat, ja que és possible que no es trobi un algorisme que solucioni el problema exposat. Però tampoc es pot buscar un model simplista, pel fet que es pot trobar un algorisme que resolgui el problema, però les solucions donades poden ser menys robustes. Per aquest motiu, és necessari arribar a un punt d'equilibri entre aquests dos tipus de models que es poden dissenyar.

L'optimització d'un procés és escollir el millor dels elements que pertanyen a un conjunt i saber els valors que han de prendre les variables, és a dir, trobar la millor solució tenint en compte els màxims i mínims que es busquen. Els problemes d'optimització matemàtica estan compostos per uns apartats:

Funció objectiu: És la mesura que es vol quantificar i optimitzar. En aquest cas, la funció objectiu és la minimització dels costos totals associats.

Variables: Són les decisions que es poden prendre i afecten la funció objectiu.

Restriccions: Són les que relacionen les variables i les funcions mitjançant equacions i inequacions on certes premisses estan obligades a satisfer.

Amb aquesta petita introducció dels tres elements principals que componen un problema d'optimització es pot entendre que un problema d'optimització. Consisteix en la cerca de valors per unes determinades variables (variables), on compleixin un seguit de requisits (restriccions) que limiten els valors de les variables de decisió, per poder proporcionar el millor valor possible per una funció (funció objectiu) que s'utilitza per mesurar el rendiment del sistema estudiat (Gonzalo et al., 2020) .

Pel que respecta els diferents tipus de problemes d'optimització en aquest estudi s'explicaran els 4 més freqüents.

Taula 26. Tipus de problemes segons les equacions i variables enteres

Tipus	Variables enteres?	
	No	Si
Equacions	No LP	MILP
no-lineals?	Sí NLP	MINLP

En el cas d'estudi d'aquest projecte com a l'hora de fer els càlculs de costos i beneficis es tenen en compte funcions no lineals i variables binàries es pot concloure que s'està davant d'un cas de problema MINLP (Mixed-Integer no linear-programing o també: programació no lineal amb variables binàries).

**Problema MINLP:** En aquest cas, la funció objectiu a minimitzar o maximitzar és una funció lineal o no lineal, on també les variables que poden o no ser enteres estan subjectes a una sèrie d'equacions/inequacions que també poden ser lineals o no lineals (Nocedal y Wright, 2006).

$$\begin{array}{llll} \min & f(x, y) & \rightarrow & \text{Funció objectiu lineal} \\ \text{s. t.} & h(x, y) = 0 & \rightarrow & \text{Restroccions d'igualtat} \\ & g(x, y) \leq 0 & \rightarrow & \text{Restriccions de desigualtat} \\ & l \leq x \leq u & \rightarrow & \text{Restriccions d'interval} \\ & x, y \geq 0 & \rightarrow & \text{Variables contínues i enteres} \end{array}$$

On:  $x \in R^n$ ;  $y \in Z^l$

En el següent apartat s'explica breument com es va procedir a crear i resoldre el problema d'optimització amb el software GAMS.

## 8.2 Identificació i descripció del problema

En aquest apartat es pretén recollir totes les dades necessàries per al sistema que s'ha d'estudiar.

També és necessari investigar i seleccionar les dades per construir el model, com per exemple, saber la quantitat volumètrica i màssica d'influent i efluent de cada tractament que s'han descrit als apartats 7.3, els tipus de tractaments que es duran a terme, les distribucions de cases que es poden fer, el nombre d'habitants de la ciutat, les previsions de precipitació entre d'altres. Cal conèixer la font de les aigües residuals, en aquest estudi són les aigües domèstiques amb unes característiques i concentracions que s'expliquen en l'apartat 7.2.1 i 7.2.3.

Un cop dissenyat el model, se li afegiran les premisses d'estudi dels casos futurs. Per tant, es tindran els següents escenaris com a casos de resultat per cada ciutat.

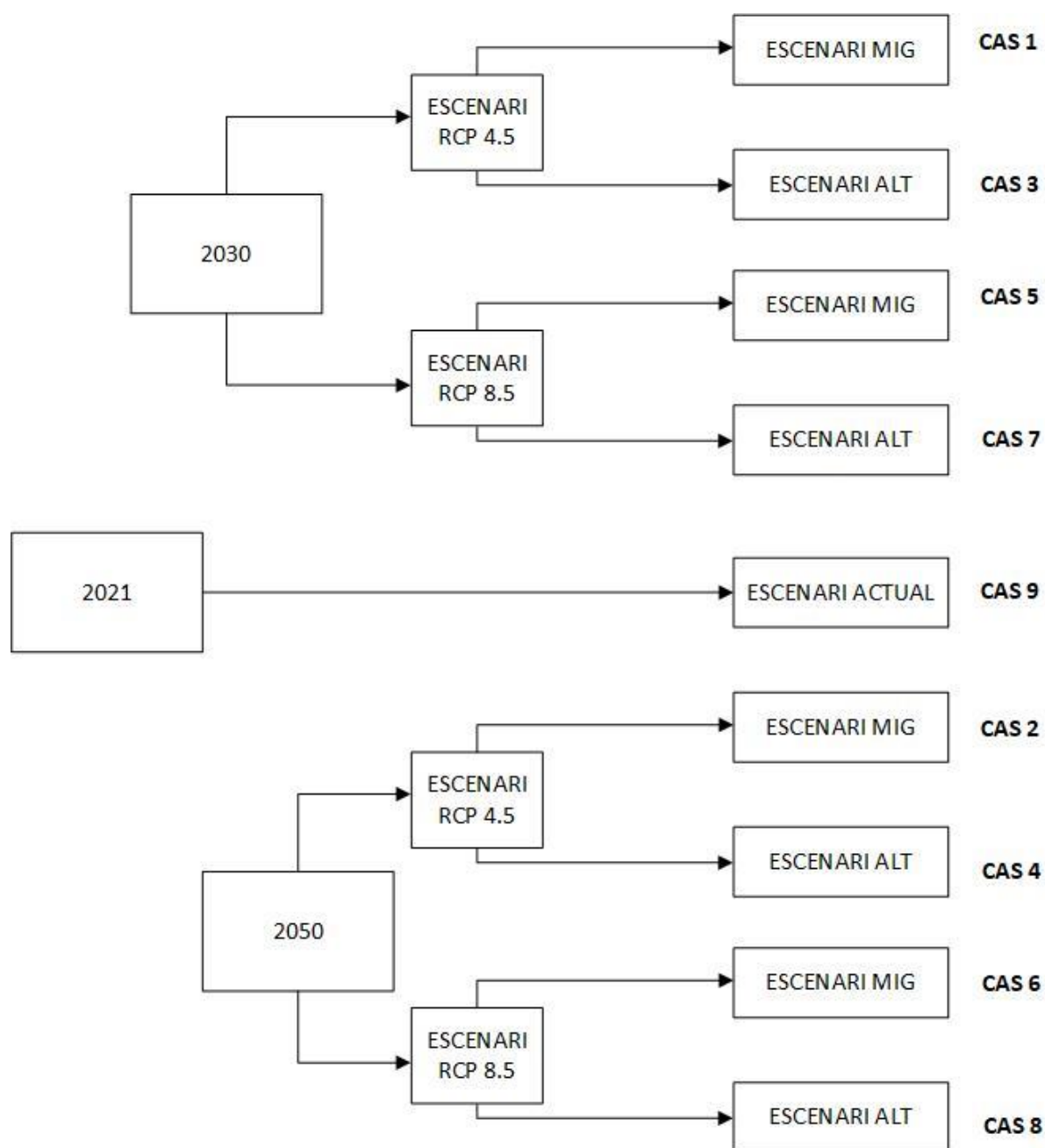


Figura 34. Esquema descriptiu dels diferents casos a optimitzar

Decisions que ha de prendre el programa tenint en compte tots els costos:

1. Quin lavabo utilitzar
2. Quina configuració de tractament d'aigües residuals a fer servir
3. Distribució de les persones per cada conjunt

L'objectiu és conèixer quin és el grau de descentralització més adient i quines tecnologies són les més adients segons el grau de descentralització i la densitat de

població. I d'aquesta manera aportar una solució per cada escenari diferent que ens podem trobar al futur.

## **8.3 Superestructura i formulació**

### **8.3.1 Superestructura**

Per solucionar el problema dissenyat, el model es basa en la generació, avaluació i selecció de la configuració i tecnologies utilitzant una superestructura que identifiqui els diferents escenaris en termes econòmics.

En la següent imatge s'explica l'esquema que es troba en el model construït, les connexions que hi ha entre cada subsistema i les opcions de descentralitzat total o un híbrid semicentralitzat.

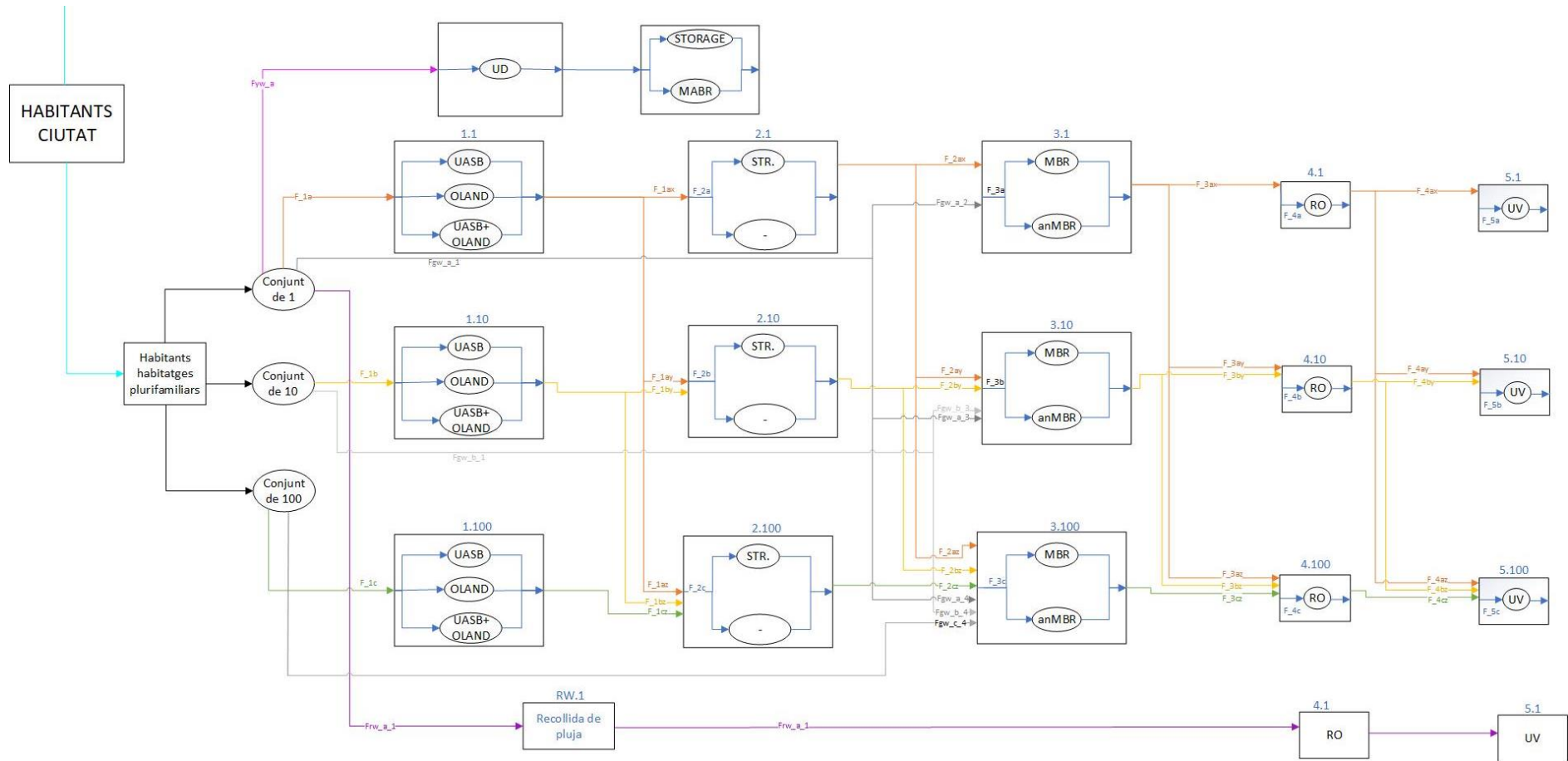


Figura 35. Esquema de la superestructura de la gestió dels habitatges plurifamiliars. Els habitatges unifamiliars són anàlegs

El model es pot explicar en 2 apartats:

El primer és per aclarir que al voler fer un model híbrid i voler conèixer el grau de descentralització òptim, s'ha decidit separar les gestions d'edificis unifamiliars i plurifamiliars, ja que les ciutats d'estudi són zones on hi ha una certa homogeneïtzació pel que respecte al tipus d'habitatges. Per tant, s'ha simplificat l'estudi i un cop conegut els tipus d'edificis i nombre de persones que viuen en habitatges plurifamiliars o unifamiliars s'ha decidit gestionar les aigües independentment entre elles.

Ara és necessari explicar la superestructura per columnes i fileres.

- Columnes: En les columnes trobem els tipus de tractaments, són un total de 5 etapes.
  - a. UASB, OLAND, UASB+OLAND
    - i. UD
    - ii. MABR, STORAGE

aquest procés només es tria si s'escull el lavabo que separa orina i defecacions i només es tracta de forma descentralitzada total.
  - b. ESTRUVITA, -
  - c. MBR, anMBR
  - d. RO
  - e. UV

[ a-c, variables de decisió que tria el model en funció del cost global]

- Fileres: En les fileres trobem el tipus de gestions que es poden fer, en aquest punt es mira el grau de descentralització. A l'hora de fer els agrupaments de gestions de cada aigua residual de cada habitat es decideixen 3 casos. El primer és fer la gestió en el mateix habitatge, el segon és fer un agrupament de 10 habitatges i finalment tenir un agrupament de 100 habitatges que es gestionin les seves pròpies aigües residuals. Aquestes fileres es poden relacionar entre elles, on es gestiona l'aigua des d'un conjunt de menor nombre d'habitatges a un conjunt amb major nombre d'habitatges.



### 8.3.2 Formulació del problema

A continuació, es parla dels tres elements principals que componen aquest problema d'optimització.

- **FUNCIÓ OBJECTIU**

En aquest apartat s'explica quina és la fórmula de la funció objectiu i per quins components està compost.

$$\min(\text{CN}) = \text{Costos} - \text{Ingresos} \quad (\text{Eq. 54})$$

Es vol minimitzar els costos nets (CN) que és el resultat de les sumes dels costos totals (C) i la resta de les suma dels Ingressos.

$$\text{Costos} = \text{Costos}^{\text{C\&B}} + \text{Costos}^{\text{RA}} + \text{Costos}^{\text{TR}} \quad (\text{Eq. 55})$$

Aquests costos estan compostos pels costos de canonades i bombeigs ( $\text{Costos}^{\text{C\&B}}$ ), costos de la recol·lecció i tractament d'aigua de la pluja ( $\text{Costos}^{\text{RA}}$ ) i els costos dels tractaments per les aigües residuals de l'habitatge ( $\text{Costos}^{\text{TR}}$ ).

$$\text{Costos}^{\text{C\&B}} = \text{Costos}_{a,j}^{\text{C}} + \text{Costos}^{\text{B}} \quad (\text{Eq. 56})$$

Els  $\text{Costos}^{\text{C\&B}}$  són independents entre ells. Mentre que els costos de canonades ( $\text{Costos}_{a,j}^{\text{C}}$ ) depèn de les distribucions dels habitatges (a) i el nombre i llargària de canonades (j), els costos de bombeigs depenen de les persones com es pot observar en l'apartat 0 i 0 que s'expliquen amb detall.

$$\text{Costos}^{\text{RA}} = \sum_{m \in \text{TM}} \text{Costos}_m^{\text{TR}} \quad (\text{Eq. 57})$$

Els costos de la recol·lecció d'aigua ( $\text{Costos}^{\text{RA}}$ ) és la suma dels costos de cada tractament (m), on TM és el conjunt de tractament que intervenen en la purificació de la pluja (TM={RO, UV, TANC D'EMMAGATZEMATGE}).

$$\text{Costos}^{\text{TR}} = \sum_{i,j} \text{Costos}_{i,j}^{\text{TR}} \quad (\text{Eq. 58})$$

Els costos dels tractaments ( $\text{Costos}^{\text{TR}}$ ) és la suma dels costos de cadascun dels tractaments  $i$  ( $\text{Costos}_i^{\text{TR}}$ ) i l'origen de les aigües a tractar ( $\text{Costos}_j^{\text{TR}}$ ).

Cada  $Costos_i^{TR}$  de cada tractament està compost pel seu respectiu Capex i Opex total. A continuació, com a exemple es descriu la formulació duta a terme pel cas del MBR.

$$Costos_{MBR}^{TR} = CAPEX_{MBR} + OPEX_{MBR}^{TOTAL} \quad (Eq. 59)$$

$$CAPEX_{MBR} = Ap_a \cdot 1060 \cdot Q_{inF_{3,a}}^{0,872} + Ap_b \cdot 1060 \cdot Q_{inF_{3,b}}^{0,872} + Ap_c \cdot 1060 \cdot Q_{inF_{3,c}}^{0,872} \quad (Eq. 60)$$

$$OPEX_{MBR}^{TOTAL} = Ap_a \cdot \sum_t \left( \frac{Opex_{MBR_{F_{3,a}}}}{(1+0.05)^t} \right) + Ap_b \cdot \sum_t \left( \frac{Opex_{MBR_{F_{3,b}}}}{(1+0.05)^t} \right) + Ap_c \cdot \sum_t \left( \frac{Opex_{MBR_{F_{3,c}}}}{(1+0.05)^t} \right) \quad (Eq. 61)$$

El Capex i Opex total del tractament MBR és definit per la suma dels costos de cadascuna de les diferents distribucions d'habitatges, que poden ser de 1 ( $F_{3,a}$ ), 10 ( $F_{3,b}$ ) o 100 ( $F_{3,c}$ ) i el nombre de les tecnologies totals per agrupació que poden ser de 1 ( $Ap_a$ ) o 10 ( $Ap_b$ ) o 100 ( $Ap_c$ ). Finalment recordar, que el càlcul de l'Opex es contempla que sigui en temps de vida útil dels aparells de  $t=30$  anys.

$$Ingressos = \sum_{i \in TI} Ingressos_i \quad (Eq. 62)$$

TI és el conjunt de tractaments dels quals es poden obtenir ingressos ( $TI = \{UASB, STRUV, anMBR, UD, MABR, STORAGE\}$ ). El càlcul desglossat és similar al càlcul de l'Opex com a l'equació 60, però amb els beneficis esmentats a l'apartat 7.3.

## • VARIABLES

- Binàries: En aquest tipus de variables es troben els tipus de lavabos (Convencional, NoMix, o al Buit), el tractament de la primera etapa (UASB, OLAND, UASB+OLAND), el tractament de la segona etapa (ESTRUVITA, NO ESTRUVITA), el tractament de la tercera etapa (MBR, anMBR) i el tractament de l'etapa de l'orina (STORAGE, MABR).
- Enteres positives: En aquest tipus de variables es troben les distribucions de les persones per gestionar en diferents tipus de conjunts d'habitatges.

També hi ha variables contínues que defineixen les variables del procés, com els cabals, les concentracions i massa dels contaminants,.

## • RESTRICCIONS

En aquest apartat s'explica les restriccions imprescindibles que s'han d'afegir a aquest problema.

Per l'escenari d'una restricció lògica es troba la possibilitat de seleccionar un tractament per seqüència,

$$\sum_{h=1}^{h=3} Y_h = 1 \quad (\text{Eq. 63})$$

Aquesta equació indica que  $Y_h$  són les decisions binàries per la decisió d'inodors ( $h$ ) i que sempre es triï només una de les 3 possibles opcions. Aquesta mateixa restricció s'utilitza per als diferents tipus de configuracions que es poden triar en cada etapa que s'ha esmentat.

## BALANÇOS

Un cop exposats els elements principals que componen el problema d'optimització cal explicar les relacions entre variables, restriccions i costos per poder traduir la superestructura de la Figura 35 en format d'equacions. La construcció de la superestructura es pot classificar en diferents tipus de balanços. En aquests tipus, es troba el balanç de les distribucions de les persones que es troba condicionat pel balanç màssic de cada contaminant, el balanç volumètric i, sobretot, pels costos que són la funció objectiu, els quals s'han explicat les respectives equacions en l'apartat 7.

### Balanç de distribució dels habitatges:

Aquestes nomenclatures i la seva relació provenen de la superestructura i és bastant intuïtiva d'entendre. El que relacionen són les entrades de persones a cada agrupació de tractaments. On primer es defineix la distribució que hi ha a l'etapa 1, en aquest cas poden haver-hi 3 distribucions que són tractar les aigües de les persones en habitatges de 1 propi ( $F_{1,a}$ ), tractar-les en un grup de 10 habitatges ( $F_{1,b}$ ) o en un grup de 100 habitatges ( $F_{1,c}$ ), després de la primera etapa el flux de persones i el tractament pot canviar la distribució d'elles. De l'etapa 1 es contempla que les

---

persones que gestionen les aigües de manera in situ ( $F_{1,a}$ ) poden continuar fent la mateixa gestió ( $F_{1,a_x}$ ), la gestió sigui en un conjunt de 10 habitatges ( $F_{1,a_y}$ ) o un conjunt de 100 habitatges ( $F_{1,a_z}$ ). De la mateixa manera pel conjunt de 10 habitatges ( $F_{1,b}$ ), poden continuar fent la mateixa gestió ( $F_{1,b_y}$ ) o agrupar-se a una gestió d'un conjunt de 100 habitatges ( $F_{1,b_z}$ ), però no es contempla que les persones que gestionen les aigües en un conjunt de 10 habitatges ho facin individualment, ja que si s'incrementa els metres de canonades també hi ha un increment del cost, i per aquest motiu ja no es contemplen aquests escenaris. Per tant, per les persones que gestionin en un conjunt de 100 habitatges a l'etapa 1 ( $F_{1,c}$ ) continuaran amb la mateixa gestió a les etapes posteriors. Seguidament, es pot observar que en l'inici de l'etapa 2 aquelles persones que fan una gestió de 10 habitatges poden provenir o de persones que fan la mateixa gestió que abans o de persones que feien la gestió in situ i s'agrupin en una gestió de grups de 10 habitatges ( $F_{2,b} = F_{1,a_y} + F_{1,b_y}$ ). Totes les fórmules descrites de la següent taula són anàlegs a l'explicació feta.

Finalment, cal esmentar que és necessari posar unes restriccions perquè es compleixi que sempre hi ha el mateix nombre de persones totals ( $F_T$ ) que s'introdueix en cada escenari.

Taula 27. Compendi de tipus de distribució per cada etapa de tractament

Distribució per l'etapa 1	Distribució per l'etapa 2	Distribució per l'etapa 3
$F_{1,a} = F_{1,a_x} + F_{1,a_y} + F_{1,a_z}$	$F_{2,a} = F_{1,a_x}$	$F_{3,a} = F_{2,a_x}$
$F_{1,b} = F_{1,b_y} + F_{1,b_z}$	$F_{2,b} = F_{1,a_y} + F_{1,b_y}$	$F_{3,b} = F_{2,a_y} + F_{2,b_y}$
$F_{1,c} = F_{1,c_z}$	$F_{2,c} = F_{1,a_z} + F_{1,b_z} + F_{1,c_z}$	$F_{3,c} = F_{2,a_z} + F_{2,b_z} + F_{2,c_z}$
Restricció:	$F_{2,a} = F_{2,a_x} + F_{2,a_y} + F_{2,a_z}$	$F_{3,a} = F_{3,a_x} + F_{3,a_y} + F_{3,a_z}$
$F_1 = F_{1,a} + F_{1,b} + F_{1,c}$	$F_{2,b} = F_{2,b_y} + F_{2,b_z}$	$F_{3,b} = F_{3,b_y} + F_{3,b_z}$
	$F_{2,c} = F_{2,c_z}$	$F_{3,c} = F_{3,c_z}$
	Restricció:	Restricció:
	$F_2 = F_{2,a} + F_{2,b} + F_{2,c}$	$F_3 = F_{3,a} + F_{3,b} + F_{3,c}$

Distribució per l'etapa 4	Distribució per l'etapa 5	Balanç Global
$F_{4,a} = F_{3,a_x}$	$F_{5,a} = F_{4,a_x}$	Restricció:
$F_{4,b} = F_{3,a_y} + F_{3,b_y}$	$F_{5,b} = F_{4,a_y} + F_{4,b_y}$	$F_T = F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = F_5$
$F_{4,c} = F_{3,a_z} + F_{3,b_z} + F_{3,c_z}$	$F_{5,c} = F_{4,a_z} + F_{4,b_z} + F_{4,c_z}$	
$F_{4,a} = F_{4,a_x} + F_{4,a_y} + F_{4,a_z}$	Restricció:	
$F_{4,b} = F_{4,b_y} + F_{4,b_z}$	$F_5 = F_{5,a} + F_{5,b} + F_{5,c}$	
$F_{4,c} = F_{4,c_z}$		
Restricció:		
$F_4 = F_{4,a} + F_{4,b} + F_{4,c}$		

En aquest balanç es pot observar que hi ha un total de 48 variables enteres que decideix el model en funció dels costos nets associats.

### Balanç màssic:

A continuació, s'explica un exemple dels balanços de matèria que es calculen pel contaminant DQO per totes les etapes i la gestió d'un habitatge, on es tenen en compte % d'eliminacions de contaminants i purgues explicats a l'apartat 7. Els corresponents càlculs per cada contaminant de les aigües i per cada gestió es troben als annexos.

#### Etapa 1.a del DQO

$$m_{inF_{1,a,DQO}} = h_a \cdot [uasb + oland + uas.olan] \cdot [m_{1,DQO} \cdot (vac. + conv.) + uridi \cdot (m_{2,2,DQO} + m_{2,1,DQO} \cdot \%_{rec.uri})] \quad (Eq. 64)$$

$$m_{inF_{1,a,divDQO}} = ha * [uridi] * m_{2,1,DQO} * (1 - \%_{rec.uri}) \quad (Eq. 65)$$

A continuació, com exemple s'explica amb detall el significat de les dues equacions i les seves nomenclatures.

Taula 28. Explicació de les nomenclatures descrites a l'etapa 1.a pel DQO

<b>Nomenclatura</b>	<b>Explicació</b>	<b>Valor</b>
$m_{inF_{1,a,DQO}}$	grams DQO/dia	Variable que depèn del tipus d'inodor i les persones que es tracten en l'etapa 1.a
$m_{inF_{1,a,divDQO}}$	grams DQO/dia	Variable que depèn de l'inodor NoMix, si no es tria aquesta part del balanç no es contempla
$h_a$	Habitants que es tracten en l'etapa 1.a	Variable que depèn de si es gestiona una casa unifamiliar o plurifamiliars igual que l'escenari si és alt o mig i l'any.
uasb + oland + uas. olan	Valors binaris que activen i desactiven quin procés se segueix a cada etapa	1 o 0. Aquests valors com no es poden superposar van acompanyats d'una restricció.
vac. +conv. +uridi	Valors binaris que activen i desactiven quin inodor s'utilitza i com a conseqüència la massa inicial que hi ha a cada procés	1 o 0. Aquests valors com no es poden superposar van acompanyats d'una restricció.
$m_{1,DQO}$	grams DQO/dia·persona d'origen d'aigües negres	És un paràmetre de valor 52,8. Aquest valor s'utilitza només si s'activa la binària vac. o conv.
$m_{2,2,DQO}$	grams DQO/dia·persona	És un paràmetre de valor 37,2. Aquest valor s'utilitza només si s'activa la binària uridi
$m_{2,1,DQO}$	grams DQO/dia·persona	És un paràmetre de valor 15,6. Aquest valor s'utilitza només si s'activa la binària uridi
$\%_{rec.uri}$	Percentatge d'orina que no es recol·lecta i s'escapa per la secció de zones fecals	És un paràmetre de valor 25. Aquest valor s'utilitza només si s'activa la binària uridi

Les següents equacions són anàlogues a l'equació de l'influent de l'etapa 1.a.

$$m_{outF_{1,a}DQO} = m_{inF_{1,a}DQO} \cdot \left[ \%_{remo.usbDQO} \cdot uasb + \%_{remo.olandDQO} \cdot oland + \%_{remo.usbDQO} \cdot \%_{remo.olandDQO} \cdot uas.olan \right] \quad (Eq. 66)$$

$$m_{outF_{1,a,divDQO}} = m_{inF_{1,a,divDQO}} * \left[ storage * \%_{remo.storageDQO} + mabr * \%_{remo.mabrDQO} \right] \quad (Eq. 67)$$

Etapa 2.a del DQO

$$m_{inF_{2,a}DQO} = m_{outF_{1,a}DQO} * [struv.] = m_{outF_{2,a}DQO} \quad (Eq. 68)$$

Etapa 3.a del DQO

$$m_{inF_{3,a}DQO} = \left[ m_{outF_{2,a}DQO} + m_{3DQO} * h_a \right] * [mbr + anmbr] \quad (Eq. 69)$$

$$m_{outF_{3,a}DQO} = m_{inF_{3,a}DQO} * [\%_{remo.mbrDQO} * mbr + \%_{remo.anmbrDQO} * anmbr] \quad (Eq. 70)$$

Etapa 4.a del DQO

$$m_{inF_{4,a}DQO} = \left[ m_{outF_{3,a}DQO} \right] \quad (Eq. 71)$$

$$m_{outF_{4,a}DQO} = m_{inF_{4,a}DQO} * [\%_{remo.RODQO}] \quad (Eq. 72)$$

Balanç volumètric:

A continuació, s'explica un exemple dels balanços de volum que es calculen per totes les etapes i la gestió d'un habitatge, aquest càlcul és necessari, ja que segons quin lavabo s'utilitzi es tracta un volum diferent d'aigua i com a conseqüència les concentracions i volums dels reactors varien fent variar el seu cost i ingressos. Els corresponents càlculs per les altres gestions es troben als annexos.

---

Etapa 1.a

$$Q_{inF_{1,a}} = ha * [uasb + oland + uas.olan] * [lit_{conv} * conv + lit_{vac} * vac + uridi(lit_{ud\ brown} + lit_{ud\ yellow} * \%_{rec.uri})] \quad (Eq. 73)$$

$$Q_{inF_{1,a,divDQO}} = ha * [uridi] * lit_{ud\ yellow} * (1 - \%_{rec.uri}) \quad (Eq. 74)$$

Taula 29. Explicació de les nomenclatures descrites a l'etapa 1.a pel DQO

Nomenclatura	Explicació	Valor
$Q_{inF_{1,a}}$	m <sup>3</sup> DQO/dia	Variable que depèn del tipus d'inodor i les persones que es tracten en l'etapa 1.a
$Q_{inF_{1,a,divDQO}}$	m <sup>3</sup> DQO/dia	Variable que depèn de l'inodor NoMix, si no es tria aquesta part del balanç no es contempla
$h_a$	Habitants que es tracten en l'etapa 1.a	Variable que depèn de si es gestiona una casa unifamiliar o plurifamiliars igual que l'escenari si és alt o mig i l'any.
$uasb + oland + uas.olan$	Valors binaris que activen i desactiven quin procés es segueix a cada etapa	1 o 0. Aquests valors com no es poden superposar van acompanyats d'una restricció.
$vac. + conv. + uridi$	Valors binaris que activen i desactiven quin inodor s'utilitza i com a conseqüència la massa inicial que hi ha a cada procés	1 o 0. Aquests valors com no es poden superposar van acompanyats d'una restricció.
$lit_{conv}$	m <sup>3</sup> DQO/dia-persona d'origen del WC convencional	És un paràmetre de valor 0,04. Aquest valor s'utilitza només si s'activa la binària conv.



Nomenclatura	Explicació	Valor
$lit_{vac}$	$m^3$ DQO/dia·persona d'origen del WC al buit	És un paràmetre de valor 0,005. Aquest valor s'utilitza només si s'activa la binària vac.
$lit_{ud\ brown}$	$m^3$ DQO/dia·persona d'origen del WC NoMix	És un paràmetre de valor 0,015. Aquest valor s'utilitza només si s'activa la binària uridi
$lit_{ud\ yellow}$	$m^3$ DQO/dia·persona d'origen del WC NoMix	És un paràmetre de valor 0,0015. Aquest valor s'utilitza només si s'activa la binària uridi
$\%_{rec.uri}$	Percentatge d'orina que no es recol·lecta i s'escapa per la secció de zones fecals	És un paràmetre de valor 25. Aquest valor s'utilitza només si s'activa la binària uridi

Les següents equacions segueixen el mateix patró que l'equació de l'influent de l'etapa 1.a.

$$Q_{out_{F_{1,a}}} = Q_{in_{F_{1,a}}} * \left[ \left( 9800 * \frac{1 - \%_{remo.usb_{DQO}}}{2400} \right) * usb + 1 * oland + \left( 9800 * \frac{1 - \%_{remo.usb_{DQO}}}{2400} \right) * 1 * uas.olan \right] \quad (Eq. 75)$$

$$Q_{out_{F_{1,a,div_{DQO}}}} = Q_{in_{F_{1,a,div_{DQO}}}} * [storage * \%_{rem.storage} + mabr * \%_{rem.mabr}] \quad (Eq. 76)$$

Etapa 2.a

$$Q_{in_{F_{2,a}}} = [struv.] * (Q_{out_{F_{1,a}}}) \quad (Eq. 77)$$

$$Q_{out_{F_{2,a}}} = Q_{in_{F_{2,a}}} * [struv.] \quad (Eq. 78)$$

Etapa 3.a

$$Q_{inF_{3,a}} = [mbr + anmbr] * (Q_{outF_{2,a}} + lit_{grey} * h_a) \quad (Eq. 79)$$

$$Q_{outF_{3,a}} = Q_{inF_{3,a}} \cdot [mbr \cdot \%_{rem.mbr} + anmbr \cdot \%_{rem.anmbr}] \quad (Eq. 80)$$

Etapa 4.a

$$Q_{inF_{4,a}} = (Q_{outF_{3,a}}) \quad (Eq. 81)$$

$$Q_{outF_{4,a}} = Q_{inF_{4,a}} \cdot \%_{rem.ro} \quad (Eq. 82)$$

## MODIFICACIÓ DE FUNCIONS I INICIALITZACIÓ

Hi ha fórmules les quals podrien donar errors en al software a l'hora de resoldre com per exemple l'Equació 36.

Si el cabal és 0 per un dels 3 efluents podria fer que el programa doni error, per aquest motiu és important reduir el seu impacte incorporant nous factors.

Modificat:

$$Opex_{mbr_1} = (-0,0509 \cdot \ln(Q_1 + eps) + 0,664) \cdot 365 \cdot Q_1 \quad (Eq. 83)$$

$$Opex_{mbr_{10}} = (-0,0509 \cdot \ln(Q_{10} + eps) + 0,664) \cdot 365 \cdot Q_{10} \quad (Eq. 84)$$

$$Opex_{mbr_{100}} = (-0,0509 \cdot \ln(Q_{100} + eps) + 0,664) \cdot 365 \cdot Q_{100} \quad (Eq. 85)$$

On:  $Q_1 \in R$ ;  $Q_{10} \in R$ ;  $Q_{100} \in R$

El que s'intenta fer amb aquestes equacions és afegir la *eps* que és igual a  $1 \cdot 10^{-6}$ , això vol dir que si Q és 0 a l'hora de calcular el logaritme neperià amb el valor de *eps* dóna un resultat que finalment es multiplica per Q que és 0, on l'equació es queda anul·lada per ella mateixa. En el cas que Q prengué un valor diferent de zero l'addició de la *eps* és menyspreable en resultat final.

Per altra banda, al ser un problema MINLP és necessari inicialitzar el problema amb una solució factible, ja que el programa per inicialitzar la seva cerca en l'òptim global

---

pot inicialitzar-se en un punt que és infactible i els altres punts també els quals en un temps transcorregut doni com a problema infactible.

### **8.3.3 Estudi d'estratègies de solució**

En aquest apartat s'explicaran les diferents estratègies per solucionar el problema, ja que segons el problema d'optimització alguns algorismes d'optimització són més adequats que altres.

Primer de tot és necessari introduir els diferents algorismes que s'utilitzen per solucionar el problema MINLP d'aquest estudi.

ANTIGONE 1.1: Algorithms for coNTinuous/Integer Global Optimization of Nonlinear Equations, aquest solver es troba optimitzacions globals per la ramificació (Misener & Floudas, 2012, 2014), ja que genera i resol relaxacions convexes de problemes MINLP no convexes que uneix la solució global, és a dir, troba solucions factibles mitjançant optimitzacions locals per generar una seqüència de relaxacions convexes que convergeixin a l'òptim global (Floudas et al., 2005; Floudas & Gounaris, 2009).

BARON: Branch-And-Reduce Optimization Navigator és un solver que cerca solucions globals per problemes NLP i MINLP que permet implementar algorismes tipus branch-and-bound per proporcionar òptims globals sota supòsits generals, això inclou l'existència de límits inferiors i superiors finits a resoldre (Tawarmalani & Sahinidis, 2001; Türkay & Grossmann, 1996).

DICOPT 2: DIscret and Continuous OPTimizer, és un solver que es basa en l'aproximació externa per l'estratègia de relaxació d'igualtat. Aquest algorisme resol una sèrie de subproblemes de NLP i MIP on pot gestionar els problemes no convexos però amb la possibilitat de no trobar l'òptim global.

Aquests 3 tipus de solvers s'han utilitzat per contrastar que encara que es resolgui per diferents tipus d'algorismes s'obté la mateixa solució.

A continuació, s'adjunta una imatge de la solució reportada pel programa Gams quan s'utilitza el solver BARON.

```

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS      142    SINGLE EQUATIONS      142
BLOCKS OF VARIABLES     155    SINGLE VARIABLES     155
NON ZERO ELEMENTS       681    NON LINEAR N-Z      398
DERIVATIVE POOL         20     CONSTANT POOL       119
CODE LENGTH              2,850  DISCRETE VARIABLES   50

GENERATION TIME          =          0.109 SECONDS      4 MB  32.2.0 rc62c018 WEX-WEI
GAMS 32.2.0 rc62c018 Released Aug 26, 2020 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows - 08/25/22 10:40:43 Page 5
MODEL DE GESTIÓ D'AIGÜES
Solution Report          SOLVE prova Using MINLP From line 795

          S O L V E      S U M M A R Y

MODEL   prova           OBJECTIVE Cost
TYPE    MINLP           DIRECTION MINIMIZE
SOLVER  BARON           FROM LINE  795

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      1 Optimal
    
```

Figura 36. Report de la solució del problema d'optimització

Amb la Figura 1 es pot observar la magnitud del model que s'ha dissenyat, ja que en el programa de GAMS només s'han afegit les equacions, variable i paràmetres que influeixen directament a la variació del càlcul del CN (cost net), és a dir, en el programa GAMS no s'ha afegit els càlculs econòmics de la recol·lecció i utilització d'aigua de pluja per consum potable perquè és un càlcul que es trobarà igual en tots els casos perquè no depèn ni del tipus d'inodor a utilitzar ni del tractament de les aigües residuals. Per tant, es pot considerar que en aquesta part del model, on només es veuen afectats els costos, es fan servir un total de 142 equacions amb 155 variables de les quals 50 són discretes.

També es pot comentar el resum del solver, on indica l'estat de la solució el qual té un valor de 1 indica que els solver ha finalitzat els càlculs sense cap interrupció per algun límit de temps, iteracions, nodes, dificultats internes o altre. Per altra banda, també es descriu l'estat del model el qual en el cas del problema del treball és 1, això vol dir que la solució és òptima i que és factible (amb certa tolerància).

## 9 Resultat i discussió

### 9.1 Resultats

#### 9.1.1 Distribució i configuracions

##### CONFIGURACIÓ DE TRACTAMENTS:

A continuació s'adjunta un esquema de la configuració òptima.

Habitatges unifamiliars:

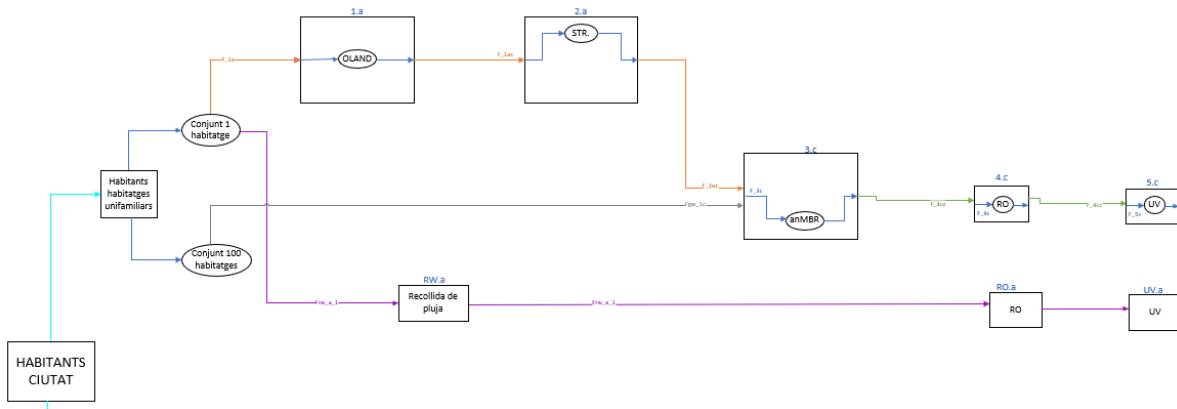


Figura 37. Configuració de distribució i tractament d'habitatges unifamiliars

En aquesta configuració les variables òptimes des de la perspectiva econòmica és utilitzar un lavabo al buit, i fer que les gestions de les aigües negres siguin in situ, mentre que les gestions del conjunt de negres tractades i grises sigui una gestió d'un conjunt de 100 habitatges. Pel que respecte a les configuracions dels tractaments es pot observar que la combinatòria per tractar les aigües és un OLAND + R. ESTRUVITA + anMBR + RO + UV.

Habitatges plurifamiliars:

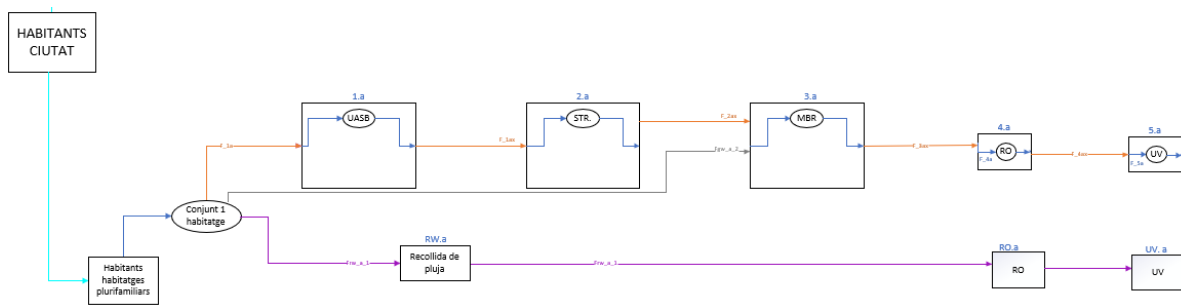


Figura 38. . Configuració de distribució i tractament d'habitatges plurifamiliars

En aquesta configuració les variables òptimes des de la perspectiva econòmica és utilitzar un lavabo al buit, i fer que les gestions de les aigües negres i grises siguin in situ en tots els tractaments. Pel que respecte a les configuracions dels tractaments es pot observar que la combinatòria per tractar les aigües és un UASB + R. ESTRUVITA + MBR + RO + UV.

Pel que respecte a la configuració de tractaments cal esmentar que en tots els escenaris l'òptim té la mateixa configuració, això és a causa de la petita variació que hi ha pel que respecte als habitants per llar, és a dir, en cada escenari les variables que s'escullen són les mateixes, però els costos i el nombre total de tractaments per cada ciutat varia. Per altra banda, hi ha tractaments i configuracions que no es tenen en compte. Com per exemple, la separació de les orines dels excrements i tractar-los per separat per aconseguir la recuperació dels nutrients.

**GRAU DE DESCENTRALITZACIÓ:**

Ara que es coneix la configuració es podria calcular el grau de descentralització de les plantes de tractament utilitzant l'equació 1.

Girona:

$$DC = \frac{(108 + 5) \cdot 2,45 \cdot 101932 - \left( \frac{(108 + 5) \cdot 245}{100} \cdot 46 + \frac{(108 + 5) \cdot 29,4}{1} \cdot 3086 \right)}{(108 + 5) \cdot 2,45 \cdot 101932} = 0,11$$

Tarragona:

$$DC = \frac{(108 + 5) \cdot 2,45 \cdot 135436 - \left( \frac{(108 + 5) \cdot 245}{100} \cdot 12 + \frac{(108 + 5) \cdot 44,10}{1} \cdot 3010 \right)}{(108 + 5) \cdot 2,45 \cdot 135436} = 0,02$$

Aquests graus de descentralització seran els mateixos per tots els escenaris, ja que es considera que la proporció d'habitatges unifamiliars i plurifamiliars són iguals per tots els escenaris.

**NOMBRE DE PUNTS DE TRACTAMENTS:**

En aquest apartat s'exposa una taula resum on indica el nombre de zones de tractaments que hi ha, és a dir zona on es tracta les aigües residuals sense transportar-se a un altre conjunt de tractament. Pel qual s'espera que hi hagi una zona de tractament per habitatge en els casos descentralitzats totals (habitatges plurifamiliars i tractament d'aigües negres per habitatges unifamiliars) i una zona de tractament per les aigües grises amb l'efluent de les aigües negres tractades pel conjunt de 100 habitatges unifamiliars.

Taula 30. Resum del nombre de zones de tractament per cada cas per la ciutat de Girona en l'escenari mig

	RCP 4.5 MIG				RCP 8.5 MIG			
	Habitatge unifamiliar		Habitatge plurifamiliar		Habitatge unifamiliar		Habitatge plurifamiliar	
	aigües negres	aigües negres i grises	aigües negres i grises	Any	aigües negres	tractament aigües negres i grises	tractament aigües negres i grises	
Any								
2021	4577	46	3086	2021	4577	46	3086	
2030	4915	50	3314	2030	4915	50	3314	
2050	5471	55	3744	2050	5471	55	3744	

Taula 31. Resum del nombre de zones de tractament per cada cas per la ciutat de Girona en l'escenari alt

RCP 4.5 ALT				RCP 8.5 ALT					
Any	Habitatge unifamiliar		Habitatge plurifamiliar		Any	Habitatge unifamiliar		Habitatge plurifamiliar	
	aigües negres	aigües negres i grises	aigües negres i grises	aigües negres i grises		aigües negres	aigües negres i grises	aigües negres i grises	aigües negres i grises
2021	4577	46	3086		2021	4577	46	3086	
2030	5354	54	3610		2030	5354	54	3610	
2050	6714	68	4527		2050	6714	68	4527	

A continuació s'adjunta una taula on es pot observar les mateixes dades que a Girona però per la ciutat de Tarragona.

Taula 32. Resum del nombre de zones de tractament per cada cas per la ciutat de Tarragona en l'escenari mig

RCP 4.5 MIG				RCP 8.5 MIG					
Any	Habitatge unifamiliar		Habitatge plurifamiliar		Any	Habitatge unifamiliar		Habitatge plurifamiliar	
	aigües negres	aigües negres i grises	aigües negres i grises	aigües negres i grises		aigües negres	aigües negres i grises	aigües negres i grises	aigües negres i grises
2021	554	6	3041		2021	554	6	3041	
2030	594	6	3265		2030	594	6	3265	
2050	661	7	3634		2050	661	7	3634	

Taula 33. Resum del nombre de zones de tractament per cada cas per la ciutat de Tarragona en l'escenari alt

RCP 4.5 ALT				RCP 8.5 ALT					
Any	Habitatge unifamiliar		Habitatge plurifamiliar		Any	Habitatge unifamiliar		Habitatge plurifamiliar	
	aigües negres	aigües negres i grises	aigües negres i grises	aigües negres i grises		aigües negres	aigües negres i grises	aigües negres i grises	aigües negres i grises
2021	554	6	3041		2021	554	6	3041	
2030	647	7	3557		2030	647	7	3557	
2050	811	9	4461		2050	811	9	4461	



D'aquests resultats globals es pot observar que les zones de tractaments on tenen com influent les aigües grises i negres tractades dels habitatges unifamiliars no treballen al 100%. És a dir, que per exemple en el cas 1 de la ciutat de Girona hi ha una zona de tractaments que té capacitat per 100 habitatges i només hi ha un conjunt de 15 habitatges unifamiliars, d'aquest resultat es pot observar que a causa de l'economia d'escala surt més a compte tenir un tractament sobredimensionat que dimensionar-ho pel nombre exacte de persones.

### 9.1.2 Qualitat de les aigües

Pel que respecte a la qualitat de les aigües que es contempen reutilitzar per consum no potable s'ha d'esmentar que hi ha 2 tipus de concentracions per tots els escenaris, igual que per configuracions com s'ha determinat en l'apartat 9.1. Aquests 2 únics tipus de concentracions per tots els escenaris rau en el fet que per calcular la concentració d'un conjunt d'habitatges només es depèn de la massa i volum que entra. Aquestes entrades van definides per la quantitat de persones que gestionen els seus residus en un tractament, el qual està imposat en un conjunt d'un habitatge, 10 habitatges o 100 habitatges.

A continuació, a la Taula 34 es mostra un resum de la qualitat dels efluent de les aigües per reutilitzar. Per cada configuració s'obtenen resultats de la qualitat d'aigua diferents:

Taula 34. Concentració dels efluent resultant de cada gestió d'aigües residuals

Concentració Final	Tractament habitatges unifamiliars (A)	Tractament habitatge plurifamiliar (B)	Diferència (A-B)	Diferència [%] (A-B/A)
DQO [mg/L]	2,39	1,69	0,7	29,29
DBO [mg/L]	1,75	0,85	0,9	51,42
NT [mg/L]	5,27	9,61	-4,34	-82,35
PT [mg/L]	0,17	0,05	0,12	70,59
SST [mg/L]	0,05	0,02	0,03	60
SSV [mg/L]	0,05	0,01	0,04	80

Com es pot observar, a causa de les diferents configuracions de tractaments per cada conjunt d'habitatges els resultats de la qualitat de l'aigua varien. Pel que respecte a la concentració final dels habitatges plurifamiliars en general són més baixes respecte a les concentracions dels habitatges unifamiliars excepte per la concentració de TN on és bastant més elevat. Aquesta diferència és perquè en la configuració dels habitatges plurifamiliars no contenen un tractament específic per l'eliminació del nitrogen en aquestes aigües.

### 9.1.3 Balanç d'aigua

Pel que respecte al balanç d'aigua, a continuació es presenta una taula resum on es pot comparar:

- Demanda normal: vol dir la demanda total anual que tindrien les ETAP de les respectives ciutats si no es contempla continuar amb les gestions actuals, aquestes dades han estat calculades a l'apartat 5.1.
- Demanda nova gestió: vol dir la demanda total anual que tindrien les ETAP de les respectives ciutats si es contempla reutilitzar l'aigua residual dels habitatges per consum no potable i reutilitzar l'aigua de les precipitacions per consum potable.
- Disponibilitat: indica quanta aigua es pot extreure de les aigües superficials de la conca Mediterrània per ús domèstic, l'explicació del càlcul es troba en l'apartat 5.2.

Taula 35. Comparació de les demandes d'aigua i disponibilitat de la ciutat de Girona en escenari mig

RCP 4.5 MIG				RCP 8.5 MIG			
	Demanda normal	Demanda nova gestió	disponibilitat		consum normal	consum nova gestió	disponibilitat
Any	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	Any	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a
2021	4,36	0,97	5,21	2021	4,36	0,97	5,21
2030	4,55	0,85	5,07	2030	4,55	0,87	4,68
2050	4,85	0,92	4,93	2050	4,85	0,95	4,57

Taula 36. Comparació de les demandes d'aigua i disponibilitat de la ciutat de Girona en escenari alt

RCP 4.5 ALT				RCP 8.5 ALT			
	consum normal	consum nova gestió	disponibilitat		consum normal	consum nova gestió	disponibilitat
Any	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	Any	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a
2021	4,36	0,97	5,21	2021	4,36	0,97	5,21
2030	4,81	0,89	5,07	2030	4,81	0,91	4,68
2050	5,51	1,04	4,93	2050	5,51	1,07	4,57

A Girona la demanda normal en tots els casos varia entre 4,36 a 5,51 hm<sup>3</sup>/any mentre que la demanda amb la nova gestió proposada varia entre 0,85 a 1,07 hm<sup>3</sup>/any com s'ha explicat en l'apartat 5.1.

Taula 37. Comparació de les demandes d'aigua i disponibilitat de la ciutat de Tarragona en l'escenari mig

RCP 4.5 MIG				RCP 8.5 MIG			
	Demanda normal	Demanda nova gestió	disponibilitat		Demanda normal	Demanda nova gestió	disponibilitat
Any	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	Any	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a
2021	5,94	1,54	6,92	2021	5,94	1,54	6,92
2030	6,19	1,43	6,73	2030	6,19	1,44	6,53
2050	6,60	1,53	6,55	2050	6,60	1,56	6,27

Taula 38. Comparació de les demandes d'aigua i disponibilitat de la ciutat de Tarragona en l'escenari alt

RCP 4.5 ALT				RCP 8.5 ALT			
	Demanda normal	Demanda nova gestió	disponibilitat		Demanda normal	Demanda nova gestió	disponibilitat
Any	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	Any	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a	hm <sup>3</sup> /a
2021	5,94	1,54	6,92	2021	5,94	1,54	6,92
2030	6,55	1,55	6,73	2030	6,55	1,57	6,53
2050	7,50	1,80	6,55	2050	7,50	1,80	6,27

A Tarragona la demanda normal en tots els casos varia entre 5,94 a 7,50 hm<sup>3</sup>/any mentre que la demanda amb la nova gestió proposada varia entre 1,43 a 1,80 hm<sup>3</sup>/any.

En el cas de Girona, s'observa que amb l'aprofitament de les aigües residuals i de les precipitacions s'aconsegueix tenir una recirculació d'aigua suficient per només haver de consumir 1,07 hm<sup>3</sup> de l'ETAP al pitjor escenari que és el cas 8. Això suposa un estalvi de 81% del consum teòric que es tindria si se segueix amb la mateixa gestió. Mentre que el pitjor cas de Tarragona és el cas 8 amb un consum de 1,80 hm<sup>3</sup> amb un estalvi de 76% amb el consum teòric, aquesta diferència de pitjor cas respecte a Girona rau en factors com la proporció d'habitatges unifamiliars i plurifamiliars, en l'ocupació d'habitants per llar a cada escenari i sobretot en la pluviometria. Però, és interessant esmentar que la reutilització d'aigua no potable, en èpoques de sequera extrema permet que sempre s'estalviï com a mínim un 70% respecte el consum teòric.

Per tant, s'observa que el balanç de l'aigua i el seu consum de la gestió proposada li influeix més la reducció de les precipitacions i els habitats per llar que l'increment de població total, aquest fet és a causa de la recol·lecció de l'aigua per superfície que hi ha i la demanda d'aquell mateix habitatge.

Respecte als balanços globals d'aigua es pot veure que la gran diferència que hi ha entre la població de Girona i Tarragona són les demandes d'aigua, la seva quantitat de recol·lecció per consum potable de cada ciutat, ja que depenen de la superfície de recol·lecció i de la quantitat de precipitacions hi ha segons la distribució d'habitatges unifamiliars i plurifamiliars.

Pitjor escenari Girona cas 8 i Tarragona cas 8:

Taula 39. Comparativa de les demandes d'aigua per cada ciutat

	Nova gestió	Actual gestió
Girona (L/any-persona) [A]	8301,22	42705
Tarragona (L/any-persona) [B]	10.543,88	43800
Diferència (L/dia-persona) [B-A]	6,14	3

S'observa que pel pitjor cas de cada ciutat, la diferència de demanda d'aigua són de 6,14 L/persona mentre que la diferència dels consums normals són de 3 L/persona. Aquesta diferència entre les demandes de cada ciutat de diferents gestions dóna una bretxa entre les ciutats de 3,14 L/persona, aquesta diferència és perquè en la nova gestió s'involucren factors com la distribució d'habitatges i la superfície de recollida d'aigües superficials com s'ha esmentat abans.

Finalment, cal remarcar que amb la nova gestió s'assoleix no sobrepassar de l'aigua disponible que té cada ciutat marcada com a objectiu pel DCFC.

Per obtenir una informació més detallada sobre l'origen dels resultats obtinguts consultar annexos.

## 9.1.4 Balanç econòmic

Pel que respecte als costos nets òptims per les noves gestions proposades per cada cas, se'n diferencien 2 tipus. Primer els costos bruts, aquells que quantifiquen la instal·lació i tractament de les aigües residuals. I com a segon tipus es troben els ingressos associats a algun tractament.

### COSTOS

Pel que respecte als costos finals, a continuació es presenta una taula resum per la ciutat de Girona on es pot trobar:

- Cost habitatges unifamiliars: En aquest cas es té en compte el cost (Capex i Opex de tractaments per gestionar les aigües per consum potable i no potable) respecte als m<sup>3</sup> d'aigua residual tractat de tots els habitatges unifamiliars de la ciutat al llarg dels 30 anys.
- Cost habitatges plurifamiliars: En aquest cas es té en compte el cost (Capex i Opex de tractaments per gestionar les aigües per consum potable i no potable) respecte als m<sup>3</sup> d'aigua residual tractat de tots els habitatges plurifamiliars de la ciutat al llarg dels 30 anys.
- Cost ciutat: En aquest cas es té en compte el cost (Capex i Opex de tractaments per gestionar les aigües per consum potable i no potable) respecte als m<sup>3</sup> d'aigua residual tractat de tots els habitatges la ciutat al llarg dels 30 anys.

Taula 40. Resum dels costos per la nova gestió proposada per la ciutat de Girona en l'escenari mig

	RCP 4.5 MIG			RCP 8.5 MIG			
	habitatges unifamiliars	habitatges plurifamiliars	Ciutat	Any	habitatges unifamiliars	habitatges plurifamiliars	Ciutat
Any	€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>	Any	€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>
2021	2,19	2,07	2,08	2021	2,19	2,07	2,08
2030	2,25	2,13	2,14	2030	2,24	2,12	2,14
2050	2,30	2,16	2,17	2050	2,11	2,15	2,17

Taula 41. Resum dels costos per la nova gestió proposada per la ciutat de Girona en escenari alt

RCP 4.5 ALT				RCP 8.5 ALT			
	habitatges unifamiliars	habitatges plurifamiliars	Ciutat		habitatges unifamiliars	habitatges plurifamiliars	Ciutat
Any	€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>	Any	€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>
2021	2,19	2,07	2,08	2021	2,24	2,07	2,08
2030	2,29	2,15	2,16	2030	2,27	2,14	2,16
2050	2,40	2,22	2,24	2050	2,38	2,21	2,23

A grans trets, s'observa que el cost més car que es pot arribar a pagar és en el cas 8. Aquest increment de cost, és a causa de l'augment de població amb una baixa ocupació d'habitants per llar, fent que la densitat de població sigui menor i com a conseqüència encarint el preu dels equips a conseqüència de l'economia d'escala. També és necessari esmentar que, encara que hi ha més habitatges unifamiliars que plurifamiliars a l'hora de fer el càlcul de €/m<sup>3</sup> s'ha de tenir en compte que hi ha més persones que viuen en habitatges plurifamiliars, en concret un 89% de la població.

A continuació, es fa l'estudi amb detall del pressupost del cas 1, els altres estudis són anàlegs i es troben a l'annex.

#### CAS 1: 2030, RCP 4.5, Escenari Mig

Taula 42. Resum des costos totals del cas 1

GESTIÓ CIUTAT TOTAL	COST	Percentatge
Tractament Aigües residuals	247 M€	82%
Tractament recoll·lecció aigua de pluja	53 M€	18%

Pel que respecte als costos totals, es pot observar que els ocupen gran percentatge d'aquests costos són els de tractament d'aigües residuals, un resultat que era d'esperar, ja que s'apliquen moltes més tecnologies per tractar més cabals d'aigües respecte a l'aigua per tractar originària de les precipitacions.

Per altra banda, és interessant analitzar quins són els tractaments o distribució que influeixen més en els costos totals segons el tipus de gestions d'habitatges.

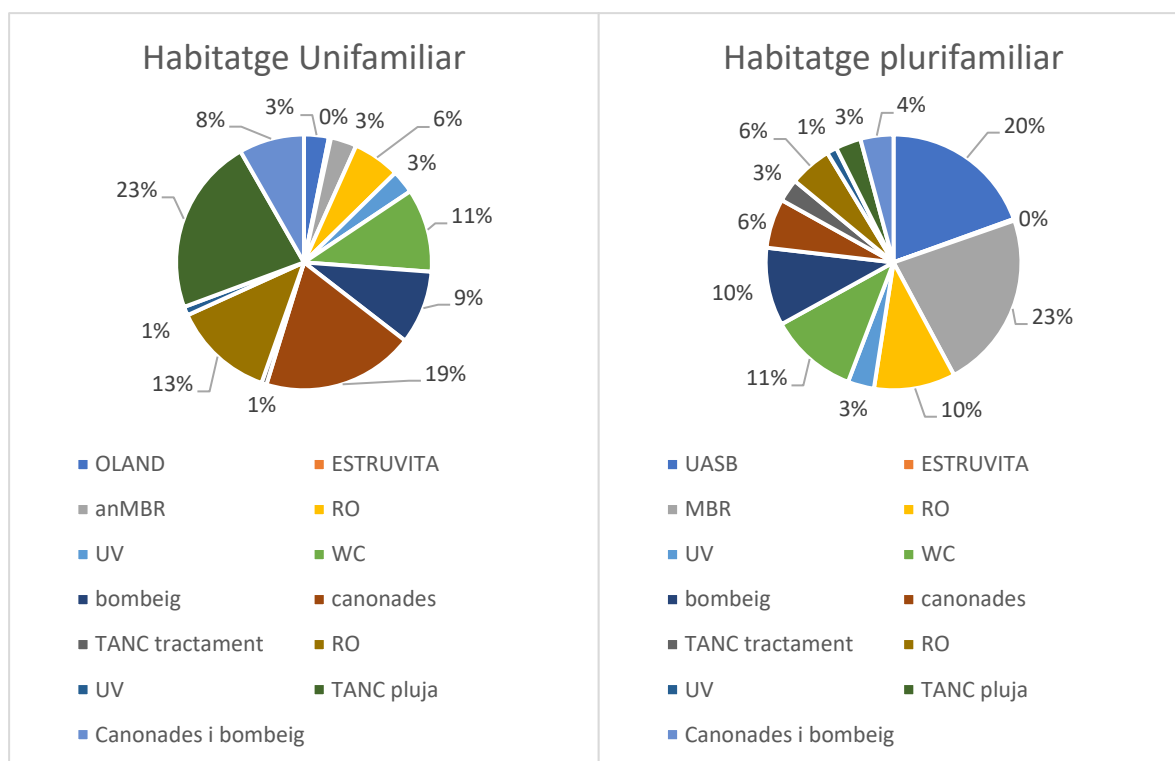


Figura 39. Percentatges dels diferents costos de la nova gestió per cada tipus d'agrupació d'habitatges pel cas 1

Pels habitatges unifamiliars el cost que afecta amb major mesura és el tanc on s'emmagatzema l'aigua de la pluja i el RO que s'utilitza (amb un 23% i 13% respectivament), això és a causa que s'ha decidit emmagatzemar i tractar l'aigua de manera descentralitzada total, i segons l'Equació 41 és més econòmic emmagatzemar i tractar grans volums d'aigua que de petits. Seguidament d'aquest cost també es troben els costos de canonades i WC ( amb un 19% i 11%), eren costos que intuïtivament eren d'esperar, ja que no depenen directament dels cabals de les aigües. Per una banda, el cost de les canonades depèn de la densitat de població perquè com més cases connectades més barates és el preu del metre per habitatge. Per altra banda, el preu del WC és un preu que només depèn del tipus de lavabo a utilitzar i el preu de l'inodor al buit és bastant elevat respecte l'inodor convencional, però si l'òptim és el lavabo al buit, vol dir que tractar menor cabal d'aigua és menys costos que tractar més cabal d'aigua però pagar un lavabo convencional a menor preu. En total aquests 4 blocs de preus componen més de la meitat (66%) dels costos total dels habitatges unifamiliars.



Pels habitatges plurifamiliars els costos que afecten en major mesura és el reactor UASB i el MBR (amb un 20 i 23% respectivament), seguits del WC, bombeig i RO de les aigües residuals (amb un 11%,10% i 10% respectivament). En aquest cas cal esmentar que aquells costos elevats són els que depenien de les persones que es gestionaven com és el cas del reactor UASB, WC i bombeig. Per altra banda, aquells que depenien del cabal de l'influent de cada tractament són el MBR i el RO. En total aquests 5 blocs suposen la majoria dels costos (74%) totals dels habitatges plurifamiliars.

Finalment, a continuació s'ensenya una taula on es pot observar els costos desglossats en forma de Capex i Opex amb els respectius percentatges per cada gestió segons els tipus d'habitatges.

Taula 43. Resum dels costos de Capex i Opex segons els tipus d'habitatges

	HABITATGE UNIFAMILIAR		HABITATGE PLURIFAMILIAR	
	CAPEX	OPEX	CAPEX	OPEX
Cost tractament Aigües residuals	14 M €	5 M €	128 M €	101 M €
% Respecte el cost de gestió del tipus d'habitatges	72%	28%	56%	44%
% Respecte el cost de gestió de la ciutat	5%	2%	42%	34%
Cost recollida aigua de pluja	15 M €	1 M €	28 M €	9 M €
% Respecte el cost de gestió del tipus d'habitatges	93%	7%	76%	24%
% Respecte el cost de gestió de la ciutat	5%	0%	9%	3%

A la Taula 43 s'observa que els Capex són els costos més elevats en tots els costos associats respecte a l'Opex.

Per una banda, es veu que el percentatge de costos de Capex pels habitatges unifamiliar (72%) són més elevats que pels habitatges plurifamiliars (56%). El mateix passa amb els costos del tractament de les aigües recollides de la pluja on en el

Capex representa un 93% sobre els costos de tractament d'aigües de pluja mentre que en els habitatges plurifamiliars és un 76%, aquesta diferència rau en el cost dels tancs d'emmagatzematge per les aigües de consum potable com s'ha pogut observar en la Figura 39.

La Taula 44 presenta els mateixos apartats presentats per a la ciutat de Girona, però ara corresponen a Tarragona.

Taula 44. Resum dels costos per la nova gestió proposada per la ciutat de Tarragona

<b>TARRAGONA</b>							
<b>RCP 4.5 MIG</b>				<b>RCP 8.5 MIG</b>			
	habitatges unifamiliars	habitatges plurifamiliars	Ciutat		habitatges unifamiliars	habitatges plurifamiliars	Ciutat
Any	€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>	Any	€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>
2021	2,19	1,92	1,93	2021	2,19	1,92	1,93
2030	2,12	1,94	1,94	2030	2,12	1,94	1,94
2050	2,17	1,97	1,97	2050	2,18	1,97	1,97
<b>RCP 4.5 ALT</b>				<b>RCP 8.5 ALT</b>			
	habitatges unifamiliars	habitatges plurifamiliars	Ciutat		habitatges unifamiliars	habitatges plurifamiliars	Ciutat
Any	€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>	Any	€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>
2021	2,19	1,92	1,93	2021	2,19	1,92	1,93
2030	2,17	1,96	1,96	2030	2,17	1,96	1,96
2050	2,28	2,02	2,02	2050	2,30	2,02	2,02

Pel que respecte a la ciutat de Tarragona, es pot observar que els preus per ciutat ronden entre 1,93 a 2,02 €/m<sup>3</sup> d'aigües residuals tractats. La diferència de preu respecte a Girona és la proporció d'habitatges unifamiliars i plurifamiliars, ja que a l'haver-hi més densitat d'habitants en els habitatges plurifamiliars de Tarragona i tenir una major proporció respecte als habitatges unifamiliars s'observa que en global el preu aigua a tractar és més baix. Cal afegir que els costos de la ciutat de Girona varien al voltant de 1 cèntim/m<sup>3</sup> segons si es diferencia entre l'escenari RCP 4.5 i el 8.5, mentre que en la ciutat de Tarragona no varia tant. Aquesta diferència es pot explicar amb la influència de les precipitacions, per tant, l'emmagatzematge de

l'aigua, i la distribució de les persones que viuen en habitatges unifamiliars i plurifamiliars.

Finalment, esmentar que el desglossament dels costos de Tarragona són molt similars als detallats al CAS 1 de Girona, per tant, aquests resultats es trobaran als annexos.

## INGRESSOS DE VENTA DE SUBPRODUCTES OBTINGUTS

A continuació, a la Taula 45 es mostra un resum dels resultats de tots els escenaris. Per obtenir una informació més detallada sobre els resultats consultar annexos.

Pel que respecte als ingressos finals, a continuació es presenta una taula resum on es té en compte els ingressos, respecte als litres d'aigua residual tractat de tots els habitatges unifamiliars, plurifamiliars i el total de la ciutat al llarg dels 30 anys que és la vida útil dels aparells que recuperen nutrients per comercialitzar, que en aquest cas són: UASB, anMBR, R. ESTRUVITA per cada respectiva configuració de cada tipus d'habitatge.

Taula 45. Resum dels beneficis per cada cas per la ciutat de Girona

<b>GIRONA</b>								
<b>RCP 4.5 MIG</b>				<b>RCP 8.5 MIG</b>				
	habitatges unifamiliars	habitatges plurifamiliars	Ciutat		habitatges unifamiliars	habitatges plurifamiliars	Ciutat	
Any	€/L	€/L	€/L	Any	€/L	€/L	€/L	€/L
2021	19,35	27,23	26,36	2021	19,35	27,23	26,36	26,36
2030	19,35	27,23	26,36	2030	19,35	27,23	26,36	26,36
2050	19,35	27,23	26,36	2050	19,35	27,23	26,36	26,36
<b>RCP 4.5 ALT</b>				<b>RCP 8.5 ALT</b>				
	habitatges unifamiliars	habitatges plurifamiliars	Ciutat		habitatges unifamiliars	habitatges plurifamiliars	Ciutat	
Any	€/L	€/L	€/L	Any	€/L	€/L	€/L	€/L
2021	19,35	27,23	26,36	2021	19,35	27,23	26,36	26,36
2030	19,35	27,23	26,36	2030	19,35	27,23	26,36	26,36
2050	19,35	27,23	26,36	2050	19,35	27,23	26,36	26,36

A l'anterior taula es pot observar que no hi ha variació del preu respecte als escenaris de RCP 4.5 i RCP 8.5 o els escenaris de creixement demogràfic mig i alt. Aquesta no variació és d'esperar, ja que el preu depèn de la producció de metà i estruvita, els quals depenen de la massa d'entrada que depenen de les persones que tracten les aigües residuals en aquell tractament i en dividir-ho pel volum tractat que també depèn de les persones el resultat sempre és el mateix en tots els casos.

Taula 46. Resum dels beneficis per cada cas per la ciutat de Tarragona

<b>TARRAGONA</b>							
<b>RCP 4.5 MIG</b>				<b>RCP 8.5 MIG</b>			
	habitatges unifamiliars	habitatges plurifamiliars	Ciutat		habitatges unifamiliars	habitatges plurifamiliars	Ciutat
Any	€/L	€/L	€/L	Any	€/L	€/L	€/L
2021	19,35	27,23	27,15	2021	19,35	27,23	27,15
2030	19,35	27,23	27,15	2030	19,35	27,23	27,15
2050	19,35	27,23	27,15	2050	19,35	27,23	27,15
<b>RCP 4.5 ALT</b>				<b>RCP 8.5 ALT</b>			
	habitatges unifamiliars	habitatges plurifamiliars	Ciutat		habitatges unifamiliars	habitatges plurifamiliars	Ciutat
Any	€/L	€/L	€/L	Any	€/L	€/L	€/L
2021	19,35	27,23	27,15	2021	19,35	27,23	27,15
2030	19,35	27,23	27,15	2030	19,35	27,23	27,15
2050	19,35	27,23	27,15	2050	19,35	27,23	27,15

En aquest cas, es pot observar que a Tarragona el preu de l'habitatge unifamiliars i plurifamiliar és el mateix que a la ciutat de Girona, però el benefici com a ciutat és més gran perquè el percentatge de persones que viuen en habitatges plurifamiliars és més gran que en la ciutat de Girona. Per tant, d'aquestes conclusions es pot extreure que com més densitat de població el benefici també és major.

En tots els casos de tota la ciutat s'afirma que els beneficis de cada ciutat són d'aproximadament de 3 cèntims el metre cúbic d'aigües residuals tractades, els quals per Tarragona representen entre un 1,49% i 1,55% dels costos bruts, i per Girona entre un 1,34% i 1,44%.

## 9.2 Discussió

Pel que fa a la concentració dels contaminants s'observa que a mesura s'aconsegueixen assolir els mínims permessos per la reutilització de l'aigua per l'ús de la configuració MBR-RO-UV, que assegura la qualitat d'una aigua pel consum humà, on una de les configuracions triades no contenia un tractament per eliminar el nitrogen de les aigües residuals, així i tot, obté concentracions de DQO i NT <10 mg/L les quals són concentracions que s'exigeixen per la reutilització de aigües residuals.

Pel que respecte a la distribució i el grau de descentralització s'ha trobat un valor molt baix respecte l'estudi fet per (Eggimann et al., 2015) on també calculava el grau de descentralització, pel qual es podria pensar que les noves tecnologies pel tractament d'aigües residuals s'estan focalitzant a poder tractar les aigües de manera descentralitzada, i així afavorir a una transició de centralitzat a descentralitzat total com està passant amb la producció d'energia elèctrica.

Pel que respecte al balanç d'aigua s'ha de comentar que en els casos més desfavorables amb la proposta de la nova gestió s'aconsegueix un balanç gairebé positiu. Aquest balanç gairebé positiu s'explica perquè a l'hora de fer la proposta pels diferents tipus de consums d'un habitatge.

Hi ha aigua, com la de recirculació d'aigües residuals per consum no potable que es podria reaprofitar per regadius o indústria i així disminuir la pressió de demanda d'aigua per aquest sector. Si s'observa la tipologia de les configuracions, podria passar que quedin sobredimensionades si es fa una inversió per una visió d'aquí a 10 anys vista perquè, segons les projeccions de l'IDESCAT, es considera que en el futur hi hagi un increment de llars, però disminució d'habitants per llar. Aquesta incertesa remarca la necessitat de més estudis en la descentralització dels diferents tractaments per gestionar les aigües residuals.

Pel que respecta al cost s'ha de dir que la comparació amb el preu actual s'ha de fer amb deteniment i cura, ja que en aquest treball s'ha tingut en compte el cost orientatiu que implicaria fer una instal·lació de nou des del punt de vista de la incorporació de noves canonades i bombaments com la d'inodors, mentre no s'ha tingut en compte

---

el cost dels tractaments dels fangs. Per tant, a l'hora de fer la comparació s'ha de tenir en compte els factors esmentats anteriorment.

A continuació, s'incorpora una gràfica per entendre l'evolució del preu de l'aigua al llarg dels anys i la seva tendència (A.C.A., 2022):

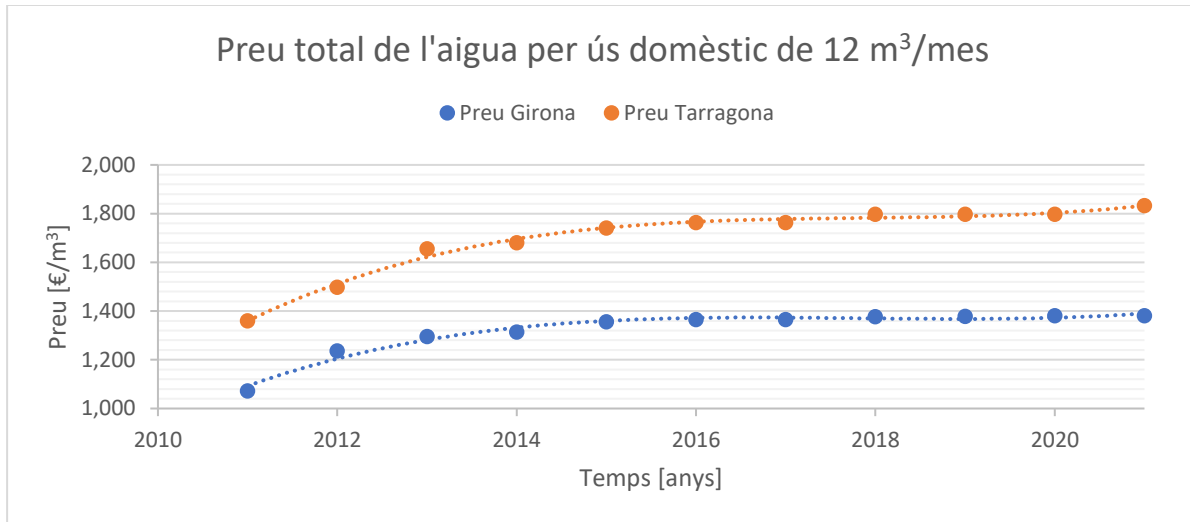


Figura 40. Preu total de l'aigua per cada ciutat

Pel cas de Girona, en el 2021, per un habitatge que consumeix 9 m<sup>3</sup> al mes paga 1,20 €/m<sup>3</sup> dels quals un 41,2% és el cost del cànon de l'aigua (el qual és un tribut amb finalitat ecològica sobre l'ús de l'aigua), pel que fa el tractament de residus i clavegueram conforma un 13,3% del preu i finalment el cost de subministrament és d'un 0,55 €/m<sup>3</sup>. Comparant directament els preus actuals amb els calculats amb la nova gestió es pot observar que en el cas 8 (escenari més desfavorable) el cost és de 2,23 €/m<sup>3</sup> i 2,08 €/m<sup>3</sup> pel cas 9. Dels quals només estan referits al volum d'aigua tractada i no s'inclou el volum tractat per consum potable. En el cas 8 hi ha una diferència de 1,03 €/m<sup>3</sup> respecte al preu del 2021 el qual no és un preu tan alt segons la tendència de preus que marca pel futur la Figura 40, però en aquest cas s'hauria d'investigar altres possibles gestions d'agrupaments d'habitatges i amb la configuració trobada fer una optimització per poder conèixer quin és el nombre òptim d'agrupaments, els quals ha estat imposat en aquest treball en 1, 10 i 100 conjunts.

Pel cas de Tarragona, en el 2021, per un habitatge que consumeix 9 m<sup>3</sup> al mes paga 1,83 €/m<sup>3</sup> dels quals un 27,4% és el cost del cànon de l'aigua (el qual és un tribut amb finalitat ecològica sobre l'ús de l'aigua), pel que fa al tractament de residus i

clavegueram conforma un 12,5% del preu i finalment el cost de subministrament és d'un 1,08 €/m<sup>3</sup>. Comparant directament els preus actuals amb els calculats amb la nova gestió es pot observar que en el cas 8 (escenari més desfavorable) el cost és de 2,02 €/m<sup>3</sup> i de 1,93 €/m<sup>3</sup> dels quals només estan referits al volum d'aigua tractada i no s'inclou el volum tractat per consum potable. Per tant, en el cas 8 hi ha una diferència de 0,10 €/m<sup>3</sup> respecte al preu del 2021 el qual no és un preu molt baix segons la tendència de preus que marca pel futur la Figura 40, podent suposar que aquest canvi per sistema de gestió a Tarragona és molt beneficiós que continuar amb la gestió actual o apostar pel subministrament d'aigües a partir de dessalinitzadores, les quals tenen un cost energètic molt elevat.

També cal considerar el nivell de maduresa de les tecnologies (TRL, en endavant), ja que segons aquest TRL les operacions i costos associats poden ser més realistes que d'altres, la qual cosa fa que en aquest estudi, aquest factor sigui una limitació que condiciona els resultats finals esmentats a l'apartat 9.1. Per exemple, per les tecnologies com el RO o el MBR són tecnologies que es poden trobar empreses com Efluence que les comercialitzen. Però, per altra banda, en aquest projecte s'incorporen tecnologies amb un TRL relativament baix com seria el cas de l'Oland, ja que és una tecnologia bastant innovadora que a causa del procés Anammox encara necessita altes inversions en R+D+i per un funcionament més general. Per això és necessari tenir en compte la maduresa dels tractaments que s'utilitzen per poder fer una valoració objectiva dels resultats, i ser més precisos en el càlcul de costos associats.

Pel que fa al tractament dels fangs, els quals no es consideren en aquest treball, es podrien fer un estudi tecno-econòmic per conèixer la recuperació que es pot obtenir d'ells, ja que són els residus de les aigües residuals ja tractades, el que vol dir que són aigües molt riques en nutrients dels quals es pot extreure una valorització molt elevada com biogàs o estruvita, entre d'altres (Kwapinski et al., 2021; Wang et al., 2018)

Per altra banda, si en un hipotètic cas s'inverteix per fer un sistema pel cas 1, és molt incert saber si es pot gestionar d'igual manera pel cas 8, per tant, a partir d'aquest model que crea diferents escenaris s'hauria de fer un segon model on es pugui fer

---

valoracions on tingui en compte el creixement demogràfic en el temps de vida útil dels aparells. Igual que no es té en compte la variació demogràfica durant els 30 anys de vida útil dels diferents tractaments, tampoc es té en compte la variació del preu de venda dels nutrients recuperats, ja que és possible que amb el pas del temps el preu hagi incrementat exponencialment per l'escassetat de recursos i que la solució òptima canviï a una configuració que recuperi més nutrients com podria ser la configuració que contempla l'ús de l'inodor NoMix.



## 10 Conclusions

Del treball s'extreuen les següents conclusions:

- S'han pogut conèixer les prediccions de disponibilitat i consum d'aigua en l'àmbit domèstic. En el cas de Tarragona, s'ha observat que a partir de l'any 2030 es presentaran problemes de disponibilitat d'aigua d'origen superficial. Mentre que a Girona el 2030 no hi ha problemes de disponibilitat d'aigua, però pel que respecta el 2050 sí que n'hi haurà. Aquestes dues projeccions marquen que s'han de fer actuacions respecte a aquesta problemàtica que és propera en el temps.
- S'han pogut estudiar diferents reactors i tractaments per gestionar les aigües, per recuperar els nutrients que conté, però sobretot per tractar-la perquè tingui una càrrega de contaminants suficientment baixa per poder reutilitzar-la per usos no potables. També s'ha observat que dintre de les configuracions possibles, aquestes contenen suficients tractaments per poder obtenir concentracions baixa d'ells i poder reutilitzar-ho per a consum no potable.
- S'ha pogut proposar una gestió que permet passar del sistema lineal de gestió de les aigües a un sistema circular, amb el seu reaprofitament dels nutrients tenint en compte la perspectiva econòmica.
- Finalment, s'ha construït un model el qual s'ha pogut optimitzar des de la perspectiva econòmica, on pugui triar la configuració més econòmica respecte al tipus d'origen de les aigües residuals i la distribució dels habitants de cada ciutat. L'estudi permet escollir la configuració òptima respecte al concepte econòmic segons les condicions d'entrada de cada escenari. Pel que podria ser una eina de comparació per projeccions futures de diferents gestions d'aigües residuals.

## 11 Planificació i pressupost

En aquesta secció es mostra la planificació i el pressupost que s'ha realitzat per dur a terme el treball.

### 11.1 Planificació

En la Figura 41 es pot observar el diagrama de Gantt fet amb l'eina Microsoft Project, on es descriuen les diferents tasques a dutes a terme.

Es pot veure que hi ha tasques relacionades entre elles i que es fan alhora, com és el cas de la definició dels escenaris des de la perspectiva de l'estudi distribució demogràfica i estudi del canvi climàtic. Seguidament, es va estudiar els tractaments convencionals per poder entendre els diferents tipus de tractaments i d'aquesta manera proposar una configuració que sigui una estructura semblant. Un cop estudiat i suggerida la possible configuració s'ha procedit a fer el disseny del model el qual s'ha dividit en dues parts. La primera part correspon al temps al qual no s'ha pogut dedicar més de 5 hores al dia perquè no hi havia més disponibilitat horària mentre que la part dos correspon a una disponibilitat total per realitzar la tasca paral·lelament amb altres.

Finalment, cal destacar que la recerca d'informació s'ha realitzat al llarg de tota la realització del treball.

## Planificació i pressupost

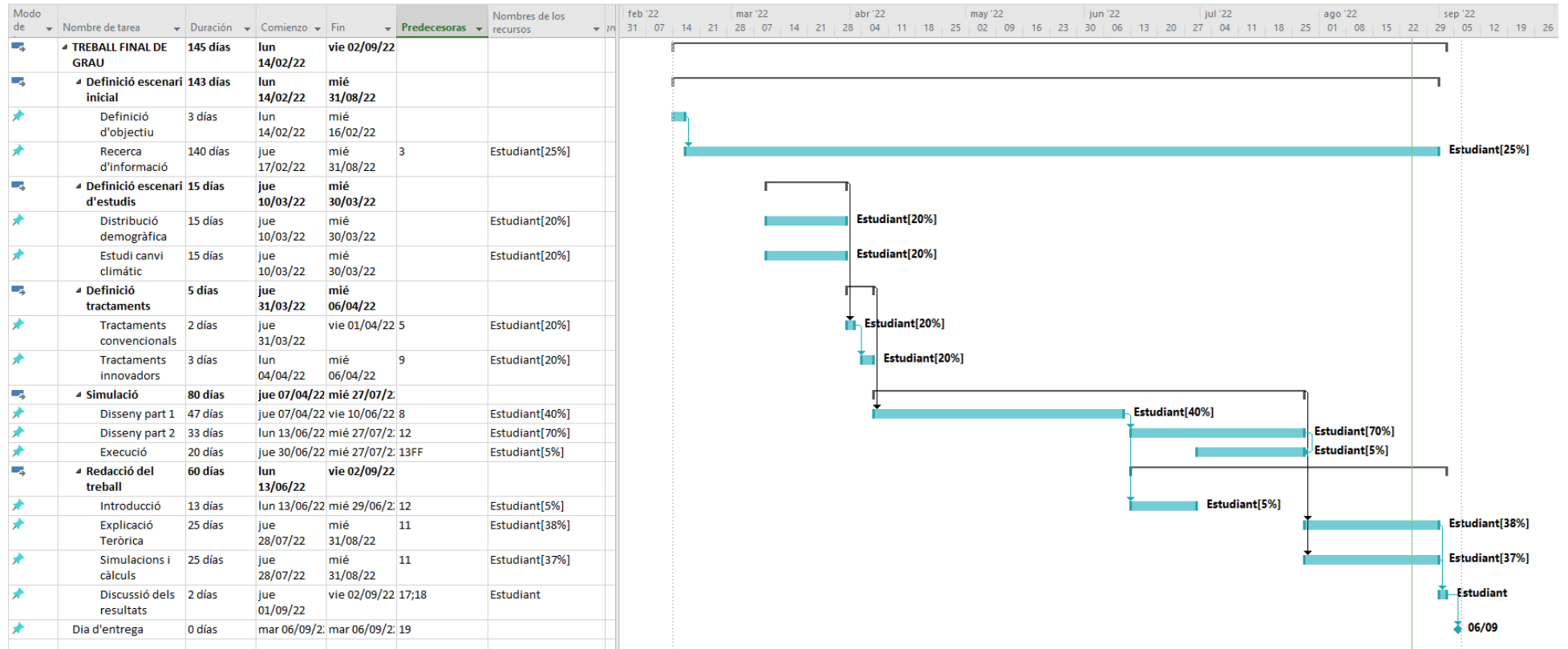


Figura 41. Resum de la planificació del treball

## 11.2 Pressupost

Els costos del projecte es poden dividir en 3 parts:

### - Mà d'obra

El cost de mà d'obra són les hores que s'han dedicat i s'han extret de l'eina Microsoft Project.

Taula 47. Cost de mà d'obra

	Hores	Cost unitari (€/h)	Cost (€)
Autor	850,4	15	12.756
Especialista 1	10	30	300
Especialista 2	4	25	100
<b>TOTAL</b>			<b>13.156</b>

### - Software

Les llicències dels programes utilitzats tenen els següents costos:

Taula 48. Cost de Software

Programa	Cost (€)
GAMS	6.400
Microsoft Excel	149
<b>TOTAL</b>	<b>6.549</b>

### - Costos Indirectes

Els costos indirectes són el 5% dels costos de mà d'obra, per tant el cost és de 657,80€.

**COST TOTAL DEL PROJECTE**

Taula 49. Cost total del projecte

	Cost subtotal (€)
Mà d'obra	13.156
Software	6.549
Costos Indirectes	657,80
TOTAL (sense IVA)	20.362,80
TOTAL (amb IVA)	24.638,99

---

## 12 Bibliografia

A.C.A. *Evolució de les dades de gestió dels fangs Actualització del document: maig de 2022*. Retrieved August 30, 2022, from [https://aca.gencat.cat/web/.content/20\\_Aigua/01\\_gestio\\_del\\_cicle\\_de\\_laigua/05\\_Tractaments\\_dels\\_fangs/3\\_dades\\_gestio\\_fangs.pdf](https://aca.gencat.cat/web/.content/20_Aigua/01_gestio_del_cicle_de_laigua/05_Tractaments_dels_fangs/3_dades_gestio_fangs.pdf)

A.C.A. *Instal·lacions de tractaments de fangs*. Retrieved August 30, 2022, from <https://aca.gencat.cat/ca/laigua/infraestructures/installacions-de-tractament-de-fangs/>

A.C.A. (2022). *Pla de gestió del districte de conca fluvial de Catalunya. 2022-2027*.

AGSST. (n.d.). *Aigües de Girona Salt i Sarrià de Ter S.A*. Retrieved August 31, 2022, from <https://www.aiguesdegirona.cat/>

Altava-Ortiz, V., & Barrera-Escoda, A. (2020). *Escenaris climàtics regionalitzats a catalunya (ESCAT-2020)*.

Ambros, R. ., (1996). Application of mathematical optimization methods for variant calculations (anwendung mathematischer optimerungsmethoden in der variantenrechnung). *Wien. Mittl. Band.*, 130, 107–133.

Angrill, S., Farreny, R., Gasol, C. M., Gabarrell, X., Viñolas, B., Josa, A., & Rieradevall, J. (2012). Environmental analysis of rainwater harvesting infrastructures in diffuse and compact urban models of Mediterranean climate. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(1), 25–42. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0330-6>

Balaguer, M. D., Puig, M. À., Salgot, M., Sànchez-Marrè, M., & Turon, C. (2007). *Gestió i tractament d'aigües residuals Xarxa temàtica*.

Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. v., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W. T., Siegrist, H., & Vavilin, V. A. (2002). The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 45(10). <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0292>

Carrillo, V., Fuentes, B., Gómez, G., & Vidal, G. (2020). Characterization and recovery of phosphorus from wastewater by combined technologies. In *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* (Vol. 19, Issue 2). <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09533-1>

Casey, E. ., Syron, E. ., Shanahan, J. W. ., & Semmens, M. J. (n.d.). *Title Comparative economic analysis of full scale MABR configurations*. <http://hdl.handle.net/10197/4263>

Cashman, S., Ma, C., Mosley, J., Cashman, S., Ma, X., Mosley, J., Crone, B., Xue, X., & Garland, J. L. (2017). Holistic evaluation of decentralized water reuse: life cycle assessment and cost analysis of membrane bioreactor systems in water reuse implementation. *Proc., 11th Int. Water Association Int. Conf. on Water Reclamation and Reuse*.

CATASTRO. *Sede Electrónica del Catastro*. Retrieved August 30, 2022, from <https://www.sedecatastro.gob.es/>

Cid, C. A., Jasper, J. T., & Hoffmann, M. R. (2018). Phosphate Recovery from Human Waste via the Formation of Hydroxyapatite during Electrochemical Wastewater Treatment. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 6(3). <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03155>

Claros, J. A. (2012). *Estudio del proceso de nitrificación y desnitrificación vía nitrito para el tratamiento biológico de corrientes de agua residual con alta carga de nitrógeno amoniacal* [Universitat Politècnica de València]. <https://riUNET.upv.es/handle/10251/17653>

Coppens, J., Lindeboom, R., Muys, M., Coessens, W., Alloul, A., Meerbergen, K., Lievens, B., Clauwaert, P., Boon, N., & Vlaeminck, S. E. (2016). Nitrification and microalgae cultivation for two-stage biological nutrient valorization from source separated urine. *Bioresource Technology*, 211. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.001>

Cordell, D., Drangert, J. O., & White, S. (2009). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19(2). <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>

Cordell, D., Rosemarin, A., Schröder, J. J., & Smit, A. L. (2011). Towards global phosphorus security: A systems framework for phosphorus recovery and reuse options. *Chemosphere*, 84(6). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.02.032>

Courtens, E. N. P., Meerburg, F., Mausen, V., & Vlaeminck, S. E. (2014). When the smoke disappears: Dealing with extinguishing chemicals in firefighting wastewater. *Water Science and Technology*, 69(8). <https://doi.org/10.2166/wst.2014.081>

Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J. P., Iglesias, A., Lange, M. A., Lionello, P., Llasat, M. C., Paz, S., Peñuelas, J., Snoussi, M., Toreti, A., Tsimplis, M. N., & Xoplaki, E. (2018). Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. In *Nature Climate Change* (Vol. 8, Issue 11). <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0299-2>

---

---

Cramer, W., Marini, K., & Guiot, J. (2020). *Canvi climàtic i ambiental a la conca mediterrània | MedECC Editat per.*

Davood Abadi Farahani, M. H., Borghei, S. M., & Vatanpour, V. (2016). Recovery of cooling tower blowdown water for reuse: The investigation of different types of pretreatment prior nanofiltration and reverse osmosis. *Journal of Water Process Engineering*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.01.011>

de Graaff, M. S., Temmink, H., Zeeman, G., & Buisman, C. J. N. (2010). Anaerobic treatment of concentrated black water in a UASB reactor at a short HRT. *Water (Switzerland)*, 2(1). <https://doi.org/10.3390/w2010101>

de Graaff, M. S., Temmink, H., Zeeman, G., & Buisman, C. J. N. (2011). Energy and phosphorus recovery from black water. *Water Science and Technology*, 63(11). <https://doi.org/10.2166/wst.2011.558>

de Graaff, M. S., Temmink, H., Zeeman, G., van Loosdrecht, M. C. M., & Buisman, C. J. N. (2011). Autotrophic nitrogen removal from black water: Calcium addition as a requirement for settleability. *Water Research*, 45(1). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.08.010>

de Graaff, M. S., Zeeman, G., Temmink, H., van Loosdrecht, M. C. M., & Buisman, C. J. N. (2010). Long term partial nitrification of anaerobically treated black water and the emission of nitrous oxide. *Water Research*, 44(7). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.12.039>

del Pino, M. P., & Durham, B. (1999). Wastewater reuse through dual-membrane processes: Opportunities for sustainable water resources. *Desalination*, 124(1–3). [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(99\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00112-5)

Deng, L., & Hägg, M. B. (2010). Techno-economic evaluation of biogas upgrading process using CO<sub>2</sub> facilitated transport membrane. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4(4). <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2009.12.013>

Dirisu, G. B., Okonkwo, U. C., Okokpujie, I. P., & Fayomi, O. S. I. (2019). Comparative analysis of the effectiveness of reverse osmosis and ultraviolet radiation of water treatment. *Journal of Ecological Engineering*, 20(1). <https://doi.org/10.12911/22998993/93978>

Dosta, J., Fernández, I., Vázquez-Padín, J. R., Mosquera-Corral, A., Campos, J. L., Mata-Álvarez, J., & Méndez, R. (2008). Short- and long-term effects of temperature on the Anammox process. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1–3). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.082>

---



- 
- Eggimann, S., Truffer, B., & Maurer, M. (2015). To connect or not to connect? Modelling the optimal degree of centralisation for wastewater infrastructures. *Water Research*, *84*, 218–231. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.07.004>
- Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M., & Ledin, A. (2002). Characteristics of grey wastewater. *Urban Water*, *4*(1). [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(01\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(01)00064-4)
- Etter, B., Tilley, E., Khadka, R., & Udert, K. M. (2011). Low-cost struvite production using source-separated urine in Nepal. *Water Research*, *45*(2). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.10.007>
- Flores, X., Vidal, N., & Bonmatí, A. (2003). Combining hierarchical decision process with multi-criteria analysis for conceptual design of WWTP. *9th IWA Conference on Design*.
- Floudas, C. A., Akrotirianakis, I. G., Caratzoulas, S., Meyer, C. A., & Kallrath, J. (2005). Global optimization in the 21st century: Advances and challenges. *Computers and Chemical Engineering*, *29*(6 SPEC. ISS.). <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2005.02.006>
- Floudas, C. A., & Gounaris, C. E. (2009). A review of recent advances in global optimization. *Journal of Global Optimization*, *45*(1). <https://doi.org/10.1007/s10898-008-9332-8>
- Fowler, D., Coyle, M., Skiba, U., Sutton, M. A., Cape, J. N., Reis, S., Sheppard, L. J., Jenkins, A., Grizzetti, B., Galloway, J. N., Vitousek, P., Leach, A., Bouwman, A. F., Butterbach-Bahl, K., Dentener, F., Stevenson, D., Amann, M., & Voss, M. (2013). The global nitrogen cycle in the Twentyfirst century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *368*(1621). <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0164>
- GAMS. (n.d.). GAMS. Retrieved August 31, 2022, from <https://www.gams.com/>
- Garrido-Baserba, M., Barnosell, I., Molinos-Senante, M., Sedlak, D. L., Rabaey, K., Schraa, O., Verdaguer, M., Rosso, D., & Poch, M. (2022). The third route: A techno-economic evaluation of extreme water and wastewater decentralization. *Water Research*, *218*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118408>
- Garrido-Baserba, M., Vinardell, S., Molinos-Senante, M., Rosso, D., & Poch, M. (2018). The Economics of Wastewater Treatment Decentralization: A Techno-economic Evaluation. *Environmental Science and Technology*, *52*(15). <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01623>
-

- 
- Gilbert, N. (2009). The disappearing nutrient. In *Nature* (Vol. 461, Issue 7265). <https://doi.org/10.1038/461716a>
- Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33(8). <https://doi.org/10.1029/2006GL025734>
- Gleick, P. H. (2014). Water, drought, climate change, and conflict in Syria. *Weather, Climate, and Society*, 6(3). <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-13-00059.1>
- Gonzalo, A. : D., Roa, M., Dirigido, M., Antonio, : D, & Moreno, B. (2020). *Problema de optimización mediante software*.
- Gouveia, J., Plaza, F., Garralon, G., Fdz-Polanco, F., & Peña, M. (2015). Long-term operation of a pilot scale anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) for the treatment of municipal wastewater under psychrophilic conditions. *Bioresource Technology*, 185. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.002>
- Gritti, M. C. (2018). *FROM EARTH TO SPACE AND BACK-NUTRIENT RECOVERY FROM URINE FOR A CIRCULAR ECONOMY*.
- Ho, J., & Sung, S. (2009). Anaerobic Membrane Bioreactor Treatment of Synthetic Municipal Wastewater at Ambient Temperature. *Water Environment Research*, 81(9). <https://doi.org/10.2175/106143009x407339>
- Höglund, C. (2001). *Evaluation of microbial health risks associated with the reuse of source-separated human urine*.
- Huang, Q. (2019). *Carbon Fiber Amended Anaerobic Biofilm Reactor for Source-separated Blackwater Treatment*.
- IDESCAT. (2021a, February 8). *Llars i grandària mitjana, projectades a 1 de gener. Per escenaris d'evolució*. <https://www.idescat.cat/indicadors/?id=aec&n=15261>
- IDESCAT. (2021b). *Llars projectades segons la grandària a 1 de gener*. <https://www.idescat.cat/indicadors/?id=anuals&n=10358>
- IDESCAT. (2022a). *Projecció projectada a 1 de gener*. <https://www.idescat.cat/pub/?id=proj&lang=es>
- IDESCAT. (2022b). *Població a 1 de gener*. <https://www.idescat.cat/indicadors/?id=aec&n=15223>
- Johansson, M., Jönsson, H., Höglund, C., Stintzing, A., & Rodhe, L. (2001). *URINE SEPARATION-CLOSING THE NUTRIENT CYCLE*.
-

- 
- Kahn, R., & Hill, P. (1998). An uncommon use: County Sanitation Districts of Los Angeles County Sends Biosolids to a Cement Plant to reduce manufacturing emissions. *Water Environment and Technology*, 10(5), 44–49.
- Kuai, L., & Verstraete, W. (1998). Ammonium removal by the oxygen-limited autotrophic nitrification- denitrification system. *Applied and Environmental Microbiology*, 64(11). <https://doi.org/10.1128/aem.64.11.4500-4506.1998>
- Kwapinski, W., Kolinovic, I., & Leahy, J. J. (2021). Sewage Sludge Thermal Treatment Technologies with a Focus on Phosphorus Recovery: A Review. *Waste and Biomass Valorization*, 12(11), 5837–5852. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01280-2>
- Larsen, T. A., & Liernert, J. (2007). *NoMix A New Approach to Urban Water Management Final Report Novaquatis Novaquatis*.
- Larsen, T. A., Udert, K. M., & Lienert, J. (2015). Source Separation and Decentralization for Wastewater Management. In *Source Separation and Decentralization for Wastewater Management*. <https://doi.org/10.2166/9781780401072>
- Leible, A. A., Seifert, H., Nieke, E., & Föhn, B. (2002). Processing of sewage sludge for energetic purposes- a challenge for process technology. *Bioprocessing of Solid Waste & Sludge*, 2(1), 19–29.
- Lema, J. M., & Suarez, S. (2017). Innovative Wastewater Treatment & Resource Recovery Technologies: Impacts on Energy, Economy and Environment . *Water Intelligence Online*, 16. <https://doi.org/10.2166/9781780407876>
- Li, X., Zhao, X., Zhang, J., Hao, J., & Zhang, Q. (2022). Struvite crystallization by using active serpentine: An innovative application for the economical and efficient recovery of phosphorus from black water. *Water Research*, 221. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118678>
- Lionello, P., & Scarascia, L. (2018). The relation between climate change in the Mediterranean region and global warming. *Regional Environmental Change*, 18(5). <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1290-1>
- Liu, M., Lü, Z., Chen, Z., Yu, S., & Gao, C. (2011). Comparison of reverse osmosis and nanofiltration membranes in the treatment of biologically treated textile effluent for water reuse. *Desalination*, 281(1). <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.08.023>
-

- 
- Liu, R., Huang, X., Chen, L., Wen, X., & Qian, Y. (2005). Operational performance of a submerged membrane bioreactor for reclamation of bath wastewater. *Process Biochemistry*, 40(1). <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2003.11.038>
- Lo, C. H., McAdam, E., & Judd, S. (2015). The cost of a small membrane bioreactor. *Water Science and Technology*, 72(10), 1739–1746. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.394>
- Lozano i Muñoz, J. C., Subiranas i Molist, J., & Sabaté i Babero, F. (2007). *Anàlisi comparativa dels processos emergents sharon i anammox per al tractament d'aigües amb una alta càrrega de nitrogen* [TFG, Universitat de Girona]. <http://hdl.handle.net/10256/76>
- Marini, A., Passoni, C., Riva, P., Negro, P., Romano, E., & Taucer, F. (2014). *Technology options for earthquake resistant, eco-efficient buildings in Europe: Research needs*. <https://doi.org/10.2788/68902>
- Martin, I., Pidou, M., Soares, A., Judd, S., & Jefferson, B. (2011). Modelling the energy demands of aerobic and anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment. In *Environmental Technology* (Vol. 32, Issue 9). <https://doi.org/10.1080/09593330.2011.565806>
- Martinez-Sosa, D., Helmreich, B., Netter, T., Paris, S., Bischof, F., & Horn, H. (2011). Anaerobic submerged membrane bioreactor (AnSMBR) for municipal wastewater treatment under mesophilic and psychrophilic temperature conditions. *Bioresource Technology*, 102(22). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.012>
- Maurer, M., Pronk, W., & Larsen, T. A. (2006). Treatment processes for source-separated urine. In *Water Research* (Vol. 40, Issue 17). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.07.012>
- Maurer, M., Scheidegger, A., & Herlyn, A. (2013). Quantifying costs and lengths of urban drainage systems with a simple static sewer infrastructure model. *Urban Water Journal*, 10(4), 268–280. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2012.731072>
- Maurer, M., Wolfram, M., & Anja, H. (2010). Factors affecting economies of scale in combined sewer systems. *Water Science and Technology*, 62(1). <https://doi.org/10.2166/wst.2010.241>
- Mayer, B. K., Baker, L. A., Boyer, T. H., Drechsel, P., Gifford, M., Hanjra, M. A., Parameswaran, P., Stoltzfus, J., Westerhoff, P., & Rittmann, B. E. (2016). Total Value of Phosphorus Recovery. *Environmental Science and Technology*, 50(13). <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01239>
-

- 
- McCabe, W., Smith, J., & Kim, J. (1993). Unit operations of chemical engineering. *Choice Reviews Online*, 30(11). <https://doi.org/10.5860/choice.30-6200>
- McCarty, P. L., Bae, J., & Kim, J. (2011). Domestic wastewater treatment as a net energy producer-can this be achieved? *Environmental Science and Technology*, 45(17). <https://doi.org/10.1021/es2014264>
- Metcalf, W., & Eddy, C. (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery, Fifth Edition. In *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery, Fifth Edition*.
- Misener, R., & Floudas, C. A. (2012). Global optimization of mixed-integer quadratically-constrained quadratic programs (MIQCQP) through piecewise-linear and edge-concave relaxations. *Mathematical Programming*, 136(1). <https://doi.org/10.1007/s10107-012-0555-6>
- Misener, R., & Floudas, C. A. (2014). A Framework for Globally Optimizing Mixed-Integer Signomial Programs. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 161(3). <https://doi.org/10.1007/s10957-013-0396-3>
- Mobley, H. L. T., & Hausinger, R. P. (1989). Microbial ureases: Significance, regulation, and molecular characterization. In *Microbiological Reviews* (Vol. 53, Issue 1). <https://doi.org/10.1128/membr.53.1.85-108.1989>
- Mohamad Mazuki, N. I., Teow, Y. H., Ho, K. C., & Mohammad, A. W. (2020). Techno-economic analysis of single disinfection units and integrated disinfection systems for sewage effluent reclamation. *Journal of Water Process Engineering*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101398>
- Padrón-Páez, J. I., Almaraz, S. D. L., & Román-Martínez, A. (2020). Sustainable wastewater treatment plants design through multiobjective optimization. *Computers and Chemical Engineering*, 140. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106850>
- Peter-Fröhlich, A., Pawlowski, L., Bonhomme, A., & Oldenburg, M. (2007). EU demonstration project for separate discharge and treatment of urine, faeces and greywater - Part I: Results. *Water Science and Technology*, 56(5). <https://doi.org/10.2166/wst.2007.577>
- Pretel, R., Robles, A., Ruano, M. v., Seco, A., & Ferrer, J. (2014). The operating cost of an anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) treating sulphate-rich urban wastewater. *Separation and Purification Technology*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.02.013>
-

- 
- Rabaey, K., Vandekerckhove, T., de Walle, A. van, & Sedlak, D. L. (2020). The third route: Using extreme decentralization to create resilient urban water systems. *Water Research*, 185. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116276>
- Randall, D. G., Krähenbühl, M., Köpping, I., Larsen, T. A., & Udert, K. M. (2016). A novel approach for stabilizing fresh urine by calcium hydroxide addition. *Water Research*, 95. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.007>
- Reith, C., & Birkenhead, B. (1998). Membranes enabling the affordable and cost effective reuse of wastewater as an alternative water source. *Desalination*, 117(1–3). [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(98\)00097-6](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(98)00097-6)
- Remy, C. (2010). *Life cycle assessment of conventional and source separation systems for urban wastewater management* [Doctoral Thesis, Technische Universität Berlin, Fakultät III - Prozesswissenschaften]. 10.14279/depositonce-2370
- Roefs, I., Meulman, B., Vreeburg, J. H. G., & Spiller, M. (2017). Centralised, decentralised or hybrid sanitation systems? Economic evaluation under urban development uncertainty and phased expansion. *Water Research*, 109, 274–286. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.051>
- Rossi, L., Lienert, J., & Larsen, T. A. (2009). Real-life efficiency of urine source separation. *Journal of Environmental Management*, 90(5). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.01.006>
- Smith, A. L., Skerlos, S. J., & Raskin, L. (2013). Psychrophilic anaerobic membrane bioreactor treatment of domestic wastewater. *Water Research*, 47(4). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.12.028>
- Tam, L. S., Tang, T. W., Lau, G. N., Sharma, K. R., & Chen, G. H. (2007). A pilot study for wastewater reclamation and reuse with MBR/RO and MF/RO systems. *Desalination*, 202(1–3). <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.12.045>
- Tarragó, E., Puig, S., Rusalleda, M., Balaguer, M. D., & Colprim, J. (2016). Controlling struvite particles' size using the up-flow velocity. *Chemical Engineering Journal*, 302. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.06.036>
- Tawarmalani, M., & Sahinidis, N. v. (2001). Semidefinite Relaxations of Fractional Programs via Novel Convexification Techniques. *Journal of Global Optimization*, 20(2).
-

- 
- Todt, D., Heistad, A., & Jenssen, P. D. (2015). Load and distribution of organic matter and nutrients in a separated household wastewater stream. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 36(12). <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.997300>
- Türkay, M., & Grossmann, I. E. (1996). Logic-based MINLP algorithms for the optimal synthesis of process networks. *Computers and Chemical Engineering*, 20(8). [https://doi.org/10.1016/0098-1354\(95\)00219-7](https://doi.org/10.1016/0098-1354(95)00219-7)
- Turon Florenza, A., Albert López-Bustins, J., Prohom Duran, M., & Manzano Rojas, A. (2021, July 7). *L'impacte del canvi climàtic en la disponibilitat d'aigua a Catalunya*. <http://hdl.handle.net/2117/349124>
- Udert, K. M., Larsen, T. A., Biebow, M., & Gujer, W. (2003). Urea hydrolysis and precipitation dynamics in a urine-collecting system. *Water Research*, 37(11). [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00065-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00065-4)
- Udert, K. M., Larsen, T. A., & Gujer, W. (2006). Fate of major compounds in source-separated urine. *Water Science and Technology*, 54(11–12). <https://doi.org/10.2166/wst.2006.921>
- Udert, K. M., & Wächter, M. (2012). Complete nutrient recovery from source-separated urine by nitrification and distillation. *Water Research*, 46(2), 453–464. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.11.020>
- US Geological Survey. (2010). *National minerals information center*. <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/publications>
- van Voorthuizen, E. M., Zwijnenburg, A., & Wessling, M. (2005). Nutrient removal by NF and RO membranes in a decentralized sanitation system. *Water Research*, 39(15). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.06.005>
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J. F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109(1). <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Vlaeminck, S. E., de Clippeleir, H., & Verstraete, W. (2012). Microbial resource management of one-stage partial nitritation/anammox. *Microbial Biotechnology*, 5(3). <https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2012.00341.x>
- Vlaeminck, S. E., Terada, A., Smets, B. F., van der Linden, D., Boon, N., Verstraete, W., & Carballa, M. (2009). Nitrogen removal from digested black water by one-stage partial
-

nitritation and anammox. *Environmental Science and Technology*, 43(13).  
<https://doi.org/10.1021/es803284y>

Wang, Q., Li, J. shan, Tang, P., Fang, L., & Poon, C. S. (2018). Sustainable reclamation of phosphorus from incinerated sewage sludge ash as value-added struvite by chemical extraction, purification and crystallization. *Journal of Cleaner Production*, 181, 717–725.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.254>

Weiland, P. (2010). Biogas production: Current state and perspectives. In *Applied Microbiology and Biotechnology* (Vol. 85, Issue 4). <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>

Windey, K., de Bo, I., & Verstraete, W. (2005). Oxygen-limited autotrophic nitrification-denitrification (OLAND) in a rotating biological contactor treating high-salinity wastewater. *Water Research*, 39(18). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.09.002>

Xing, C.-H., Wu, W.-Z., Qian, Y., & Tardieu, E. (2003). Excess Sludge Production in Membrane Bioreactors: A Theoretical Investigation. *Journal of Environmental Engineering*, 129(4). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(2003\)129:4\(291\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(2003)129:4(291))

Young, T., Muftugil, M., Smoot, S., & Peeters, J. (2012). MBR vs. CAS: Capital and operating cost evaluation. *Water Practice and Technology*, 7(4).  
<https://doi.org/10.2166/wpt.2012.075>

Zeeman, G., & Lettinga, G. (1999). The role of anaerobic digestion of domestic sewage in closing the water and nutrient cycle at community level. *Water Science and Technology*, 39(5). [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00101-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00101-8)