

Tractament d'aigües residuals mitjançant un sistema híbrid d'aiguamolls artificials: cap a una depuració més verda

Memòria del Projecte de Fi de Carrera de Ciències Ambientals

Autor: Albert Barons Savall

Directors: Dr. Anna Serra Clusellas i Dr. José Peral Pérez



Universitat Autònoma
de Barcelona

Facultat de Ciències

Llicenciatura de Ciències Ambientals

3 de Setembre de 2012

Aquest treball ha estat imprès amb paper reciclat per tal de minimitzar l'impacte sobre el medi natural.

Agraïments

Després de recórrer un llarg camí, per fi he arribat al final d'aquest viatge que vaig emprendre ara fa quatre anys quan vaig escollir estudiar la llicenciatura de ciències ambientals a la Universitat Autònoma de Barcelona. En aquell moment no estava gens segur de si havia escollit la millor opció, però després de totes les experiències que he viscut aquests anys, ara crec que vaig encertat. Per aquest motiu primer de tot m'agradaria donar les gràcies a les úniques persones que han fet possible que hagi arribat fins aquí, no només pel seu suport econòmic sinó també pels continus ànims en tots els moments bons i dolents, encoratjant-me a seguir i avançar en el que realment crec que és la meua vocació. Els meus pares.

Seguidament m'agradaria donar les gràcies a la persona que ha fet possible que aquest projecte hagi tirat endavant, tot i els moments de dificultat, la Dr. Anna Serra Clusellas. Anna, gràcies per aquell primerencontre a la biblioteca, gràcies per ser la meua tutora, gràcies per la pressió exercida per a què el projecte superes totes les traves inicials, gràcies pel teu suport, gràcies per ajudar-me en tot moment per petit que fos el problema i encara que estiguessis atabalada per la feina. En definitiva, moltes gràcies per tot.

Agrair també a tot l'equip del centre tecnològic Leitat per la seva acollida, paciència i ajuda. No diré noms perquè segur que em deixaria algú, però només he de dir que treballar en aquest ambient de companyonia i bon rotllo és una cosa que molts cops no es pot pagar amb diners. De la mateixa manera donar les gràcies a Hidroquímia, i especialment a la Zoraida Zeledon per la seva gran feina durant les fases de disseny i construcció del sistema d'aiguamolls artificials. També a l'empresa Naturalea per les magnífiques aportacions que van fer per al sistema híbrid.

També he de fer menció especial al Dr. José Peral Pérez. Agrair-li que volgués ser el meu tutor de la UAB, perquè sense ell no hagués pogut realitzar el projecte.

Finalment donar les gràcies a totes aquelles persones que en algun moment m'han preguntat quin projecte realitzava, tot i que molts cops no acabessin d'entendre que coi estava fent. A tots ells, amics i familiar, gràcies per haver-vos preocupat ni que fos un instant per aquest projecte, per la vostra ajuda i suport.

Moltes gràcies a tots vosaltres, i a tots aquells que algun cop us pareu un moment per a llegir aquest projecte, espero que trobeu el que buscàveu quan us hi veu fixar.

Albert Barons Savall

Índex

0. Resum.....	10
1. Context.....	12
2. Justificació.....	14
3. Objectius.....	16
4. Introducció.....	18
4.1 Legislació vigent.....	18
4.2 Estat de l'art dels aiguamolls artificials.....	18
4.2.1 Tipologia d'aiguamolls artificials.....	18
4.2.2 Aspectes rellevants en el disseny de sistemes d'aiguamolls.....	21
4.2.3 Tipologia i característiques de la vegetació.....	23
4.2.4 Tipologia i característiques del llit granular.....	24
4.2.5 Mecanismes d'eliminació dels principals contaminants als aiguamolls.....	25
4.2.6 Aiguamolls artificials per eliminar contaminants específics.....	28
5. Part experimental.....	32
5.1 Aigües residuals inicials.....	32
5.2 Sistema híbrid d'aiguamolls construït.....	32
5.2.1 POU DE CAPTACIÓ.....	33
5.2.2 TANC HOMOGENEÏTZADOR.....	34
5.2.3 AIGUAMOLLS ARTIFICIALS.....	34
5.3 Manteniment i evolució de la vegetació.....	39
5.4 Paràmetres analítics, mètodes i equips.....	39
5.4.1 Carboni Orgànic Total (TOC) i Nitrogen Total (NT).....	40
5.4.2 Terbolesa.....	40
5.4.3 Sòlids en suspensió.....	41
5.4.4 Laminocultius.....	42
5.4.5 Demanda Bioquímica d'Oxigen (DBO ₅).....	43
5.4.6 Demanda Química d'Oxigen (DQO).....	44
5.4.7 Nitrats i Nitrits.....	45
5.4.8 Fòsfor total.....	45
5.4.9 Amoni.....	46
5.4.10 pH.....	47
5.4.11 Conductivitat elèctrica (CE).....	47
6. Resultats i discussió.....	49
6.1 Caracterització de l'aigua residual inicial.....	49
6.2 Anàlisi al laboratori.....	51
6.2.1 Sistema híbrid funcionant amb AFSSV inundat (DEL 19/7/2012 al 16/8/2012).....	51
6.2.2 Sistema híbrid funcionant amb AFSSV buit (Setmana del 16/08/2012 al 23/08/2012).....	61

6.3 Evolució de la vegetació.....	67
7. Conclusions.....	70
8. Recomanacions i propostes de millora.....	73
9. Programació.....	75
10. Pressupost.....	77
11. Bibliografia.....	80
Annexos.....	84

Índex de taules

Taula 1. Avantatges i desavantatges de la utilització de AFS i AFSS. Fonts: “Folletos informativos de Tecnología de Aguas Residuales de la EPA, 2000”; Plaza de los Reyes C.S. 2001; i García J. i Corzo A. 2008.....	19
Taula 2. Tipologies de substrat utilitzades al medi granular i característiques. Font: García y Corzo 2008.....	25
Taula 3. Caracterització fisicoquímica de l'aigua residual inicial. Font: Leitat.....	49
Taula 4. Caracterització microbiològica de l'aigua residual inicial. Font: Leitat.....	50
Taula 5. Resultats del TOC diari amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.....	51
Taula 6. Resultats de la DQO diària amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.....	52
Taula 7 i 8. Resultats del TOC setmanal amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.....	52
Taula 9 i 10. Resultats de la DQO setmanal amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.....	52
Taula 11. Resultats de la DBO ₅ i relació DBO ₅ /DQO setmanal amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.....	53
Taula 12. Resultats del NT diari amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.....	55
Taula 13 i 14. Resultats del NT setmanal amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.....	55
Taula 15 i 16. Resultats de l'amoni setmanal amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.....	56
Taula 17 i 18. Resultats del fòsfor total setmanal amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.....	57
Taula 19 i 20. Resultats dels SS setmanals amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.....	58
Taula 21 i 22. Resultats de terbolesa setmanals amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.....	58
Taula 23. Resultats del pH setmanal amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.....	59
Taula 24. Resultats de la CE setmanal amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.....	60
Taula 25. Resultats del TOC diari amb AFSSV buit. Font: Elaboració pròpia.....	62
Taula 26 i 27. Resultats del TOC setmanal amb AFSSV buit. Font: Elaboració pròpia.....	62
Taula 28 i 29. Resultats de la DQO setmanal amb AFSSV buit. Font: Elaboració pròpia.....	62
Taula 30. Resultats de la DBO ₅ i relació DBO ₅ /DQO setmanal amb AFSSV buit. Font: Elaboració pròpia.....	62
Taula 31. Resultats del NT diari amb AFSSV buit. Font: Elaboració pròpia.....	64
Taula 32 i 33. Resultats del NT setmanal amb AFSSV buit. Font: Elaboració pròpia.....	64
Taula 34 i 35. Resultats de l'amoni setmanal amb AFSSV buit. Font: Elaboració pròpia.....	64
Taula 36 i 37. Resultats del fòsfor total setmanal amb AFSSV buit. Font: Elaboració pròpia.....	65
Taula 38 i 39. Resultats dels SS setmanals amb AFSSV buit. Font: Elaboració pròpia.....	66
Taula 40 i 41. Resultats de la terbolesa setmanal amb AFSSV buit. Font: Elaboració pròpia.....	66

Taula 42. Resultats del pH setmanal amb AFSSV buit. Font: Elaboració pròpia.....	67
Taula 43. Resultats de la CE setmanal amb AFSSV buit. Font: Elaboració pròpia.....	67
Taula 44. Resultats evolució vegetació. Font: Elaboració pròpia.....	68
Taula 45. Concentracions màximes contaminants aigües no domèstiques a l'entrada de depuradora. Font: Decret 130/2003.....	84
Taula 46. Exemple Excel per calcular DBO ₅	91

Índex de figures

Figura 1. A. Representació d'un aiguamoll artificial de flux superficial. B. Representació d'un aiguamoll artificial de flux subsuperficial horitzontal. Font: García J. i Corzo A., 2008.....	20
Figura 2. Representació d'un aiguamoll artificial de flux subsuperficial vertical. Font: García J. i Corzo A., 2008.....	21
Figura 3. Muntatge per agafar l'aigua residual inicial. Font: Elaboració pròpia.....	33
Figura 5. Tanc d'homogeneïtzació.....	34
Figura 4. Plantació <i>P.australis</i>	35
Figura 6. Entrada aigua residual a l'AFSSV.....	36
Figura 7. Aiguamoll de flux subsuperficial vertical. Font: elaboració pròpia.....	37
Figura 8. Aiguamoll de flux subsuperficial horitzontal.....	37
Figura 9. Aiguamoll de flux superficial.....	38
Figura 10. Vista del sistema híbrid d'aiguamolls artificials complet. Font: elaboració pròpia.....	38
Figura 11. Resultats laminocultius: flora total amb AFSSV inundat. D'esquerra a dreta, els resultats corresponen a: i) aigua d'entrada al sistema, ii) aigua del AFSSV, iii) aigua del AFSSH, iv) aigua del AFS. Font: Elaboració pròpia.....	60
Figura 12. Resultats laminocultius enterobacteris amb AFSSV inundat. D'esquerra a dreta, els resultats corresponen a: i) aigua d'entrada al sistema, ii) aigua del AFSSV, iii) aigua del AFSSH, iv) aigua del AFS. Font: Elaboració pròpia.....	61
Figura 13. Programació. Font: elaboració pròpia.....	85
Figura 14. Requisits fisicoquímics d'aigua d'abocament provinent d'EDAR. Font: Directiva 91/271/CEE.....	86
Figura 15. Requisits microbiològics d'aigua d'abocament provinent d'EDAR. Font: Directiva 91/271/CEE.....	91
Figura 16. Fotografies sistema híbrid, setmana 1. Font: elaboració pròpia.....	92
Figura 17. Fotografies sistema híbrid, setmana 2. Font: elaboració pròpia.....	93
Figura 18. Fotografies sistema híbrid, setmana 3. Font: elaboració pròpia.....	94
Figura 19. Fotografies sistema híbrid, setmana 4. Font: elaboració pròpia.....	95
Figura 20 Fotografies sistema híbrid, setmana 5. Font: elaboració pròpia.....	96
Figura 21 Fotografies sistema híbrid, setmana 6. Font: elaboració pròpia.....	97

0. Resum

Les aigües residuals són aquelles derivades de les activitats humanes, ja sigui involuntàriament o de forma intencionada. Aquest és el punt de partida del present projecte. És inqüestionable que aquestes aigües no es poden tornar a abocar al medi natural d'on s'han extret sense ser tractades prèviament, ja que contenen diferents tipus de contaminants que perjudiquen greument el nostre entorn. Des de que l'ésser humà va adonar-se d'aquesta evidència han aparegut sistemes de depuració d'aquestes aigües. L'objectiu principal d'aquest projecte és la posada en marxa d'un sistema híbrid d'aiguamolls artificials que pugui realitzar aquesta funció tan necessària per a la nostra societat, en aquest cas depurant les aigües residuals provinents d'un centre tecnològic (en què es combinen aigües sanitàries i aigües provinents dels laboratoris de recerca), de forma que compleixin els requisits marcats a la llei per al seu abocament al medi natural. El desenvolupament del present projecte segueix les bases del mètode científic, és a dir unes hipòtesis que hem formulat als objectius. Col·laboració en el disseny i construcció de l'experiment, el sistema híbrid d'aiguamolls. La recollida de mostres i posterior anàlisi de diferents paràmetres d'aquestes aigües abans i després de ser tractades. En aquest cas també s'ha fet un seguiment i evolució, tant del sistema com de la vegetació planta. I finalment l'anàlisi dels resultats i posterior discussió per veure si s'han complert els objectius.

De forma general, els resultats han estat bastant positius, tant en la configuració amb l'AFSSV inundat i buit. No obstant això, s'observa que amb l'AFSSV s'observen clars avantatges en l'eliminació de força contaminants. Les aigües compleixen pràcticament tots els límits de contaminants establerts per la llei, menys l'amoní per algun tipus d'error humà o interferències i algun dia la DBO₅.

Durant la durada de l'experimentació han sorgit alguns problemes amb el sistema, els quals es recomana solucionar per a posteriors projectes. Els més destacats són les característiques del tanc d'homogeneïtzació i l'eutrofització a l'AFS.

Per tant, podem concloure que s'ha confirmat el que apuntava la bibliografia, en què aquests sistemes híbrids d'aiguamolls poden ser un substitut als tractaments convencionals de depuració de les aigües residuals. Tanmateix amb algunes limitacions i un llarg recorregut que encara s'ha de seguir en aquest camp de la investigació. Projectes com aquest, que suposen l'inici d'un projecte més gran, poden ajudar a sumar en l'objectiu que ha de ser crear un món més sostenible.

1.Context

Aigües residuals: aigües que contenen residus diversos procedents de la indústria, de nuclis de població humana o d'activitats agropecuàries. Font: Agència Catalana de l'Aigua.

Aquest és el punt de partida d'aquest projecte. Tal i com queda reflectit a la definició, les aigües residuals són aquelles derivades de les activitats humanes, ja sigui involuntàriament o de forma intencionada. És inqüestionable que aquestes aigües no poden tornar a abocar-se al medi natural d'on s'han extret sense ser tractades prèviament ja que contenen diferents tipus de contaminants que perjudiquen greument el nostre entorn. En aquest punt és on neix la necessitat de l'existència d'estacions depuradores d'aigua residual. Al llarg d'aquest projecte s'observarà que no només hi ha una única via per a realitzar aquest procés, sinó que el tractament objecte d'estudi d'aquest projecte (sistema híbrid d'aiguamolls artificials) s'està investigant i implantant com una estratègia capaç d'eliminar diversa tipologia de contaminants de l'aigua amb gran eficiència. Això sí, encara queda molt de recorregut i investigació en aquest camp, cap a un desenvolupament més sostenible.

2.Objectius

L'objectiu principal d'aquest projecte és la posada en marxa d'un sistema híbrid d'aiguamolls artificials més compacte que permeti reduir la gran superfície que es necessita *a priori* per aquests sistemes, així com dur a terme la depuració d'aigües residuals provinents d'un centre tecnològic (en què es combinen aigües sanitàries i aigües provinents dels laboratoris de recerca), de forma que compleixin els requisits marcats a la llei per al seu abocament al medi natural.

Aquest objectiu tan general es pot desglossar en altres de secundaris que conformaran el desenvolupament del projecte. Entre aquests, s'hi inclouen la integració i participació dins d'un grup de professionals del Centre Tecnològic Leitat en les fases de recerca d'informació, disseny i construcció del sistema d'aiguamolls artificials. Un altre objectiu secundari, de caire més personal, és aprendre i dur a terme totes les anàlitzes de diversos paràmetres fisicoquímics, necessàries per a dur un control acurat i precís del funcionament i evolució del sistema de manera autònoma. Finalment, l'objectiu secundari més rellevant és comparar el sistema en dues configuracions diferents, determinant les diferències en l'eficiència d'eliminació dels diferents contaminants.

A part dels objectius directament relacionats amb aquest projecte, la posada en marxa d'aquest sistema híbrid d'aiguamolls artificials també servirà com a punt de partida per a un projecte més ampli, d'àmbit estatal, en què una de les tasques de recerca que es duu a terme des del centre tecnològic Leitat en col·laboració amb l'empresa HIDROQUÍMIA és l'estudi de múltiples factors i característiques relacionades amb el nou disseny de tecnologia verda.

3. Justificació

Els aiguamolls artificials són sistemes verds dissenyats i construïts amb l'objectiu d'eliminar els contaminants de l'aigua residual a través de l'ús de diferent tipologia de plantes pròpies de zones humides, intentant imitar els processos químics, físics i biològics que es duen a terme en un aiguamoll natural. En conseqüència, es caracteritzen per presentar un baix requeriment energètic, un cost d'inversió inicial competitiu, un baix cost de manteniment, possibilitat d'integració al paisatge i no generar gran quantitats de fangs (García J. i Corzo A., 2008). Per contra, solen necessitar una elevada superfície per a dur a terme el tractament (Uggetti E. et al., 2011).

Totes aquestes raons fan pensar en un futur esperançador pel que fa al tema de la depuració de les aigües residuals d'una forma més natural i sostenible. Aquest projecte vol contribuir, encara que de forma modesta, a avançar en el llarg camí que encara falta recórrer en aquest camp de la tecnologia, duent a terme la posada en marxa d'un nou sistema híbrid d'aiguamolls artificials i col·laborant en una de les tasques d'un projecte estatal en què s'investigaran nous materials, dissenys, plantes o altres factors que permetin al sistema ser més eficient i contribuir a un millor rendiment en l'eliminació dels contaminants abocats a les aigües residuals.

Actualment, alguns petits pobles disposen de certs sistemes similars de depuració d'aigua (Vera I. et al., 2011). A Dinamarca, Alemanya i al Regne Unit existeixen aproximadament 200 aiguamolls en funcionament per al tractament d'aigües residuals (Brix H., 1994). Evidentment, actualment és impossible pensar en la implementació d'aquesta tecnologia globalment i a escala molt gran. Però cal seguir avançant en aquest sentit per aconseguir millores que puguin, potser en un futur, ajudar, encara que només sigui en alguna fase concreta, a una depuració de les aigües residuals millor i més sostenible (Uggetti E. et al., 2012).

4. Introducció

4.1 Legislació vigent

Actualment, els abocaments d'aigües residuals estan molt controlats per mitjà de la llei. Totes les administracions, des de l'àmbit europeu fins al català tenen normatives relacionades amb aquest tema. Es tracta de limitar els nivells de certes substàncies, anomenades contaminants depenent de les concentracions, per afavorir una millor conservació de l'estat del medi natural que ens envolta. Als annexes s'inclouen diverses taules que marquen aquests límits. L'annex I conté els límits marcats al Decret 130/2003, on s'indiquen les concentracions màximes d'alguns contaminants en una aigua no domèstica quan entra en una depuradora pública. Aquestes aigües no domèstiques han de complir com a mínim la qualitat que marca aquest decret.

L'annex II fa referència a una normativa europea que marca la qualitat de l'aigua a abocar a llera pública. Es tracta de la directiva 91/271/CEE sobre els requisits d'abocament procedents d'instal·lacions de depuració d'aigües residuals urbanes mitjançant tractament secundari.

Evidentment, les aigües que surtin del sistema d'aiguamolls artificials proposat en aquest projecte hauran de complir aquestes normatives.

4.2 Estat de l'art dels aiguamolls artificials

4.2.1 Tipologia d'aiguamolls artificials

Els aiguamolls artificials es poden classificar en diferents tipus en funció del seu comportament hidràulic (García J. i Corzo A., 2008):

- **Aiguamolls de flux superficial (AFS):** la circulació de l'aigua a depurar és principalment superficial, a través de la tija i les fulles de la vegetació. L'altura de la làmina d'aigua lliure és, en general, inferior a 1 metre i la direcció del flux de l'aigua és horitzontal.
- **Aiguamolls de flux subsuperficial (AFSS):** la circulació de l'aigua a depurar és subterrània, a través d'un medi granular, arrels i rizomes de la vegetació. En funció de la direcció del flux d'aigua, aquest tipus d'aiguamolls es poden classificar com:
 - **Aiguamolls de flux subsuperficial horitzontal (AFSSH):** el flux es continu, horitzontal, saturat d'aigua i predominen els processos anòxics com la desnitrificació, i anaerobis com la reducció sulfat i la fermentació.
 - **Aiguamolls de flux subsuperficial vertical (AFSSV):** l'aigua circula a través del llit granular de forma intermitent i verticalment, alternant períodes de càrrega i repòs alternadament. Predominen els processos aeròbics com ara la oxidació de la matèria orgànica i la nitrificació.

Els AFSS es caracteritzen per la capacitat de tractar altes càrregues de contaminants, per la qual cosa són utilitzats com a tractament secundari. Per tant, en aquesta fase s'eliminen la gran majoria de contaminants presents a l'aigua com ara l'excés de matèria orgànica. En canvi, els AFS, al posseir menor capacitat per a reduir la càrrega de contaminants, són utilitzats generalment com a tractament terciari. Poden utilitzar-se per higienitzar l'aigua, reduint els organismes patògens que s'hi troben, com ara coliformes fecals (Matamoros V. et al., 2010).

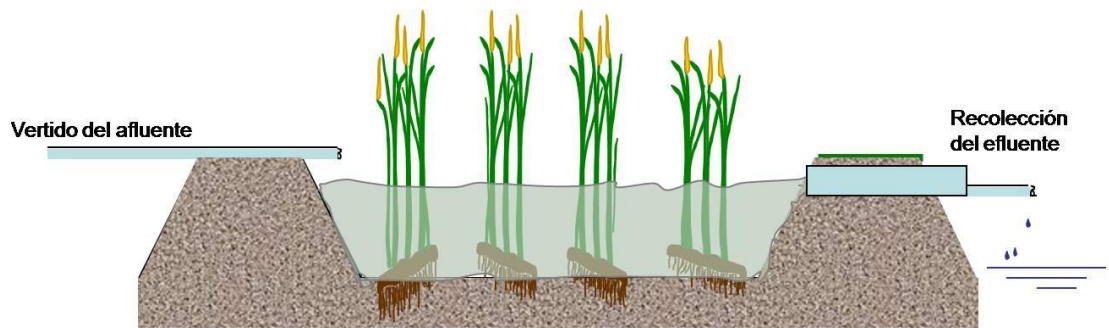
Per aquesta raó, els sistemes híbrids, que resulten d'una combinació dels sistemes anteriors, són una gran opció per augmentar l'eliminació dels contaminants amb alguns efectes sinèrgics com ara l'eliminació de nitrogen.

La taula 1 mostra els avantatges i desavantatges d'utilitzar AFS i AFSS.

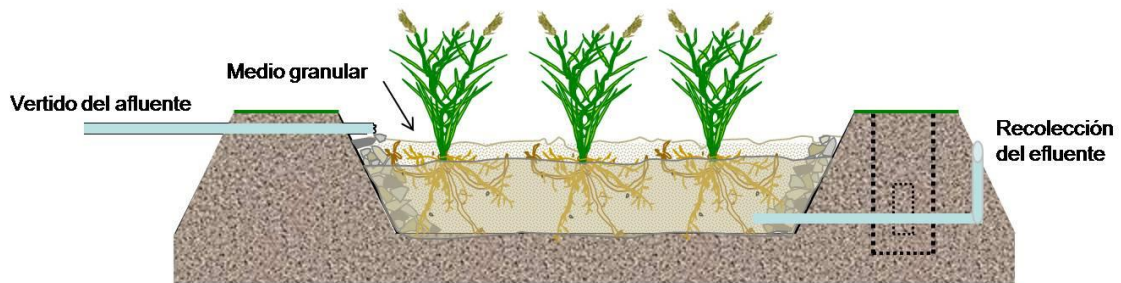
Taula 1. Avantatges i desavantatges de la utilització de AFS i AFSS. Fonts: "Folletos informativos de Tecnología de Aguas Residuales de la EPA, 2000"; Plaza de los Reyes C.S. 2001; i García J. i Corzo A. 2008.

Avantatges	Desavantatges
AFS	
<ul style="list-style-type: none"> • Els AFS proporcionen tractament efectiu de forma passiva i minimitzen la necessitat d'equips mecànics, electricitat i monitoratge per part d'operadors especialitzats. • Els AFS poden ser menys costosos en les fases de construcció, funcionament i manteniment que els processos mecànics i convencionals de tractament. • El funcionament com a tractament secundari és possible durant tot l'any amb l'excepció dels climes més freds. • El funcionament com a tractament terciari avançat és possible durant tot l'any en climes càlids o semi càlids. • Els sistemes d'AFS posseeixen una gran adaptació a l'espai natural, incloent la incorporació d'hàbitats per a la vida silvestre i oportunitats per a crear espais de lleure públics. • Els sistemes d'AFS no produeixen biosòlids ni fangs residuals que requeririen el posterior tractament i emmagatzematge. • L'eliminació de DBO, SST, DQO, metalls i compostos orgànics de les aigües residuals pot ser molt efectiva amb un temps de retenció raonable. Per altra banda, l'eliminació de nitrogen i fòsfor a baixos nivells també pot ser efectiva amb un temps de retenció significativament més gran. 	<ul style="list-style-type: none"> • La necessitat de terreny pot ser gran, especialment si cal eliminar grans quantitats de nitrogen i fòsfor. • L'eliminació de DBO, DQO i nitrogen als aiguamolls és un procés biològic, continu i renovable. Per contra, el fòsfor, els metalls i alguns compostos orgànics persistents romanen lligats als sediments del sistema i s'acumulen amb el temps. Això pot provocar una disminució de la capacitat d'eliminació. • En climes freds es redueix la taxa d'eliminació de DBO i la nitrificació/desnitrificació. Es pot solucionar augmentant la taxa de retenció, però això pot portar a un sobredimensionament dels aiguamolls, fent-los inviables. • Depenent de les càrregues de contaminant presents a l'aigua residual pot produir-se l'eutrofització d'aquest, amb les conseqüents desviacions que això pot produir en la depuració de la mateixa. • Al tenir una làmina d'aigua lliure pot presentar problemes amb mosquits i altres insectes perjudicials per a la salut humana. • La població d'aus o d'altres animals pot interferir en l'eliminació dels contaminants degut en gran mesura als excrements, entre d'altres. • Els AFS poden eliminar organismes patògens almenys en un ordre de magnitud, però això no sempre és suficient per a complir els límits que marca la llei.
AFSS	
<ul style="list-style-type: none"> • Els AFSS proporcionen tractament efectiu de forma passiva i minimitzen la necessitat d'equips mecànics, electricitat i monitoratge per part d'operadors especialitzats. • Els AFSS poden ser menys costosos en les fases de construcció, funcionament i manteniment que els 	<ul style="list-style-type: none"> • Un AFSS requereix una àrea més extensa si es compara amb els sistemes mecànics convencionals de tractament. • L'eliminació de DBO, DQO i nitrogen als aiguamolls és un procés biològic, continu i renovable. Per contra, el fòsfor, els metalls i alguns compostos orgànics

<p>processos mecànics i convencionals de tractament.</p> <ul style="list-style-type: none"> • El funcionament com a tractament secundari és possible durant tot l'any amb l'excepció dels climes més freds. • El funcionament com a tractament terciari avançat és possible durant tot l'any en climes càlids o semi càlids. • Els AFSS proporcionen una major protecció tèrmica que els AFS. • Els sistemes d'AFSS no produeixen biosòlids ni fangs residuals que requeririen el posterior tractament i emmagatzematge. • Els AFSS són molt efectius en l'eliminació de la DBO, DQO, SST, metalls i alguns compostos orgànics persistents de les aigües residuals. L'eliminació de nitrogen i fòsfor és possible per amb un temps de retenció major. • Els mosquits i altres insectes amb una problemàtica associada no són un obstacle en aquest cas, mentre el funcionament sigui l'adequat i el nivell subsuperficial es mantingui. 	<p>persistents romanen lligats als sediments del sistema i s'acumulen amb el temps. Això pot provocar una disminució de la capacitat d'eliminació.</p> <ul style="list-style-type: none"> • En climes freds es redueix la taxa d'eliminació de DBO i la nitrificació/desnitrificació. Es pot solucionar augmentant la taxa de retenció, però això pot portar a un sobredimensionament dels aiguamolls, fent-los inviables. • Els AFSS no poden ser dissenyats per aconseguir una eliminació completa dels compostos orgànics, SST, nitrogen o coliformes. • Els AFS poden eliminar organismes patògens almenys en un ordre de magnitud, però això no sempre és suficient per a complir els límits que marca la llei. • Els AFSS poden tenir menor superfície que els AFS per a l'eliminació dels contaminants. Tot i això, es necessita més quantitat de llit de grava que en els AFS, per tant els costos econòmics en la construcció també són més elevats.
---	---



A.



B.

Figura 1. A. Representació d'un aiguamoll artificial de flux superficial. B. Representació d'un aiguamoll artificial de flux subsuperficial horitzontal. Font: García J. i Corzo A., 2008.

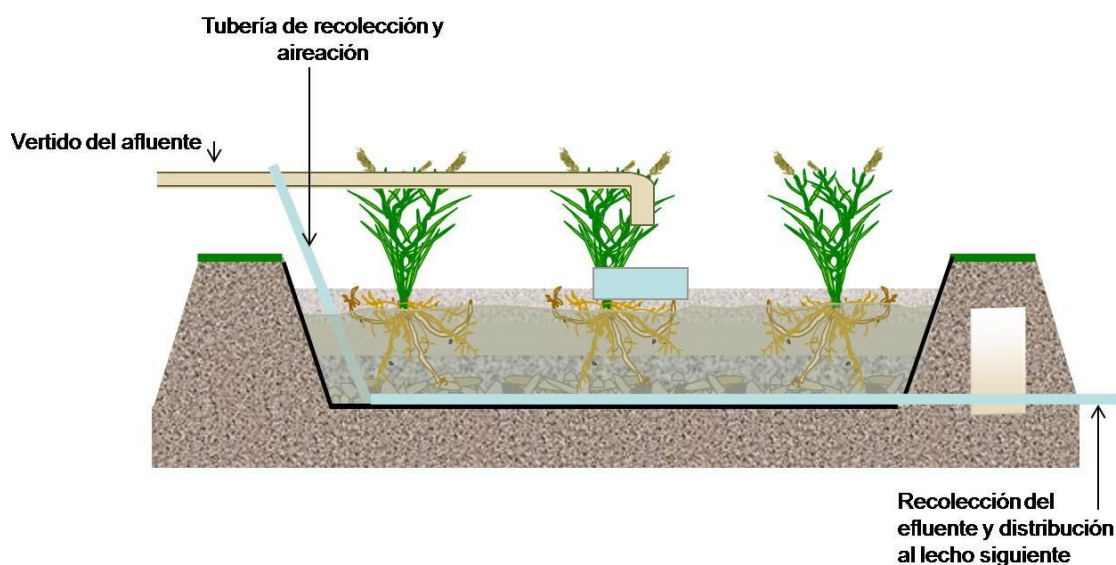


Figura 2. Representació d'un aiguamoll artificial de flux subsuperficial vertical.
 Font: García J. i Corzo A., 2008.

4.2.2 Aspectes rellevants en el disseny de sistemes d'aiguamolls artificials

Aquest apartat està dedicat bàsicament al disseny dels aiguamolls artificials. Hi ha molta bibliografia relacionada amb aquest tema, per la qual cosa s'ha intentat resumir de manera breu els elements i les característiques més importants que haurien de tenir els aiguamolls artificials per tal d'obtenir un major rendiment i, per tant, una bona eliminació dels contaminants.

Per norma general, els aiguamolls artificials consten d'unes parts i elements comuns per al seu correcte funcionament. Aquestes són les estructures d'entrada de l'afluent o aigües residuals, una bona impermeabilització del terreny, el medi granular, la vegetació i les estructures de sortides de les aigües. A més, en els aiguamolls de flux subsuperficial vertical es poden incloure uns tubs verticals per a una millor aireació (García J. i Corzo A., 2008).

Aiguamolls de flux superficial (AFS)

El disseny d'aquests aiguamolls permet que l'aigua estigui exposada directament a l'atmosfera, per la qual cosa posseeix unes propietats completament diferents als AFSS. També poden entendre's com una modificació dels sistemes d'aiguamolls naturals, amb una profunditat de làmina d'aigua apropiada d'entre 0,3 i 0,4 metres, segons García J. i Corzo A. (2008). Per altra banda, la capa de sòl que s'utilitza com a zona d'arrelament acostuma a tenir entre 0,2 i 0,3 m de profunditat (Vymazal J., 2008).

Com ja s'ha mencionat anteriorment, els AFS tenen una menor capacitat de tractament respecte els AFSS, major risc de contacte de l'aigua amb les persones i

possibles problemes d'aparició d'insectes i males olors. Tot i això, poden ser de gran interès en projectes de restauració ambiental.

A l'hora de la recerca bibliogràfica, cal remarcar que aquest és el tipus d'aiguamoll amb menys informació disponible. Això pot representar una gran dificultat a l'hora de plantejar el projecte, però també una oportunitat per plantejar possibles estudis futurs en aquest àmbit.

Aiguamolls de flux subsuperficial vertical (AFSSV)

La circulació de l'aigua dins de l'aiguamoll és bàsicament vertical i es produeix mitjançant descàrregues intermitents, per tant el sistema no està permanentment inundat. Segons García J. i Corzo A. (2008), la profunditat del medi granular ha de ser d'entre 0,5 i 0,8 metres. Altres autors proposen profunditats semblants, per exemple Plaza de los Reyes C.S. i col·laboradors (2001) que l'estableixen entre 0,3 i 1 metre. Tot i així, la més comuna acostuma a ser 0,5 metres.

Aquest tipus d'aiguamoll pot operar amb una càrrega aproximada de 20 g DBO/m²·dia (García J. i Corzo A., 2008). Segons Cooper P. (2003), la càrrega pot oscil·lar entre 20 i 40 g DBO/m²·dia. Generalment requereix menor superfície que l'aiguamoll de flux subsuperficial horitzontal per a una determinada càrrega de matèria orgànica, encara que els problemes de rebliment del medi granular tendeixen a ser més importants. De la mateixa manera, com a conseqüència de les seves característiques s'obtenen millors taxes de transferència d'oxigen (10 a 24 mg oxigen/m²·dia) (Cooper P., 2005) que en els sistemes de flux subsuperficial horitzontal (2,1 a 5,7 mg oxigen/m²·dia) (Crites R., 2006).

La mida del medi granular ha de ser major a l'entrada i a la sortida per a una millor distribució de l'aigua, així com per facilitar l'entrada i la sortida d'aquesta (Crites R., 2006).

Segons García J. i Corzo A. (2008), el dimensionament d'aquest tipus d'aiguamolls es realitza utilitzant unes regles pràctiques basades en superfícies unitàries, generalment referides a la superfície necessària per habitant equivalent. Això es deu en gran mesura a la falta d'investigació realitzada en aquest camp, sobretot en aquest tipus d'aiguamoll. Generalment es poden dimensionar aquests sistemes basant-nos en la regla de 2,5 m²/hab·eq. (Cooper P., 2005). A més a més, en petits municipis es pot suposar que 1 hab·eq. correspon a 40g DBO /·dia (Barrera A., 1999).

Aiguamolls de flux subsuperficial horitzontal (AFSSH)

En aquest tipus d'aiguamoll la circulació de l'aigua és bàsicament horitzontal. Segons García J. i Corzo A. (2008), la profunditat adequada per aquest tipus de sistema és de 0,3 a 0,9 metres, tenint en compte que s'ha de treballar sempre pràcticament inundat amb el nivell d'aigua a 0,05- 0,1 metres per sota la superfície. Alguns estudis apunten que amb una profunditat d'aigua de 0,3 i 0,35 metres de medi granular

s'aconsegueixen molt bons resultats en l'eliminació de contaminants (García J. et al., 2004).

D'aquest mateix document podem extreure que la càrrega que pot suportar aquest aiguamoll és d'aproximadament 6g DBO/m²·dia.

La mida del medi granular ha de ser major a l'entrada i a la sortida per a una millor distribució de l'aigua, així com per facilitar l'entrada i la sortida d'aquesta (Crites R., 2006).

El dimensionament dels aiguamolls de flux subsuperficial horitzontal pot realitzar-se en dues etapes seguint els passos exposats a García J. i Corzo A. (2008). Aquest procediment consta de dues parts: en la primera, s'ha de determinar la superfície necessària per al tractament de l'aigua residual, l'anomenat dimensionament biològic. En la segona part és quan s'estableixen les dimensions geomètriques del sistema, en aquest cas s'anomena dimensionament hidràulic.

En aquest apartat no s'exposen les fórmules i càlculs necessaris per a dimensionar aquest tipus d'aiguamoll. Tot i que durant el projecte s'ha participat en el disseny aportant idees i informació, el disseny final ha estat realitzat per un grup professional d'enginyers amb uns coneixements i eines complicades d'adquirir, tant per la dificultat d'aquestes com per la durada del projecte.

Sistemes híbrids

La combinació d'aiguamolls artificials de diferent configuració, com per exemple l'acoblament d'un AFSSV amb un AFSSH i finalment un AFS, representa una opció gens menyspreable per afavorir l'eliminació dels contaminants. Entre els processos més importants podem trobar l'oxidació de la matèria orgànica, la nitrificació i posterior desnitrificació del nitrogen, l'eliminació del fòsfor i l'eliminació de patògens. Segons García J. i Corzo A. (2008), els sistemes híbrids poden ser dimensionats considerant una superfície unitària necessària de 2,5 m²/hab·eq.

4.2.3 Tipologia i característiques de la vegetació

En el moment de seleccionar les plantes que s'utilitzaran en els aiguamolls artificials s'haurien de seguir una sèrie de recomanacions (Tanner C., 1996):

- Utilitzar espècies locals i autòctones amb alta tolerància a les condicions del clima, plagues i malalties.
- Utilitzar espècies que creixin habitualment de forma natural als aiguamolls o riberes dels rius. D'aquesta manera les seves arrels ja estan adaptades a les condicions de saturació d'aigua i s'aconsegueix una millor adaptabilitat ecològica.
- Preferiblement s'han d'usar plantes amb arrels extenses i sistemes de rizomes subterranis. Aquestes plantes han de tenir una gran capacitat de propagació i creixement.

- Les plantes han de poder suportar altes càrregues de matèria orgànica, nutrients i contaminants, així com períodes curts de sequera. D'acord amb l'objectiu de l'aiguamoll, aquestes han de tenir una alta capacitat d'eliminar els contaminants, ja sigui en forma d'assimilació directa o indirecta, millorant els processos microbians de nitrificació, desnitrificació i altres processos microbians.

Generalment, les plantes utilitzades són macròfits emergents. S'obtenen bons resultats utilitzant plantacions de canyís (*Phragmites australis*), boga (*Typha latifolia* o *T. Angustifolia*) o joncs (*Scirpus lacustris*). No és necessari utilitzar espècies diferents en una mateixa instal·lació, ja que l'eficiència del sistema no es veu molt afectada. A Europa i en països amb un clima fred la planta més utilitzada és el canyís (*Phragmites australis*), amb densitats d'aproximadament tres exemplars per metre quadrat (García J. i Corzo A., 2008).

4.2.4 Tipologia i característiques del llit granular

El medi granular té moltes funcions en els aiguamolls construïts, sobretot en els aiguamolls de flux subsuperficial. A més a més de realitzar la funció de suport pel creixement i desenvolupament de la vegetació plantada, també intervenen de forma important en l'eliminació de contaminants de les aigües tractades. En aquest sentit, permet la creació d'un biofilm al seu voltant, juntament amb les plantes, la contribució del qual és molt important per a l'eliminació eficient dels contaminants del sistema. Per altra banda, mitjançant l'adsorció es retenen alguns contaminants, eliminant-los així també de l'aigua residual (García J. i Corzo A., 2008).

Aquest medi granular, sempre parlant d'aiguamolls construïts de flux subsuperficial, pot dividir-se en les zones d'entrada i sortida, i el present a la resta de l'aiguamoll.

El material que s'utilitza a les entrades i sortides ha de tenir un diàmetre més gran que el de la resta de l'aiguamoll per diverses raons: millor distribució de l'aigua fent que cobreixi tot el sistema, no obstruir els conductes de recollida de l'aigua, etc. El material utilitzat ha de ser net, el més homogeni possible, dur i capaç de mantenir la forma a llarg termini (García J., et al., 2004).

Segons García J. i Corzo A. (2008), els materials granítics amb diàmetres mitjans de 5-6 mm ofereixen molt bons resultats. En el cas, per exemple, de sistemes horitzontals s'ha comprovat que profunditats del medi granular de 0,35 ajuden a eliminar de forma eficient els contaminants (García J., et al., 2004).

En la taula 2 es mostren diferents tipus de substrat que es poden o s'acostumen a utilitzar en la construcció d'aiguamolls de flux subsuperficial.

Taula 2. Tipologies de substrat utilitzades al medi granular i característiques. Font: García y Corzo 2008

Material	Mida efectiva, en mm	Porositat, en %	Conductivitat Hidràulica, Ks ($m^3/m^2 \cdot d$)
Arenes gradades	2	28-32	100-1000
Arenes gravoses	8	30-35	500-5000
Graves fines	16	35-38	1000-10000
Graves mitjanes	32	36-40	10000-50000
Roques petites	128	38-45	50000-250000

Tot i que els tipus de materials més utilitzats en el llit granular són roques, graves granítiques o arena, la bibliografia mostra com el material de pissarra és millor que la grava en l'eliminació del fòsfor, tenint en compte un temps de residència de 2,2 dies (Tang X.Q. et al., 2009). Aquesta dada s'està demostrant a escala de laboratori, en columnes d'adsorció plenes de substrat.

4.2.5 Mecanismes d'eliminació dels principals contaminants als aiguamolls artificials

A continuació s'exposen resumidament les hipòtesis més acceptades en referència a la forma per la qual s'eliminen els contaminants en els aiguamolls artificials. Tot i que la recerca i els estudis en alguns camps encara estan poc desenvolupats, hi ha força informació sobre aquests processos.

Tota la informació que consta en aquest apartat ha estat extreta del "Manual de depuración de aguas residuales urbanas (Alianza por el agua)" i del manual "Depuración con humedales construidos" (García J. i Corzo A., 2008).

Sòlids en suspensió

Els principals mecanismes que intervenen en l'eliminació dels sòlids en suspensió són:

- Sedimentació: la matèria en suspensió que pot sedimentar, principalment de naturalesa orgànica, decanta exclusivament per l'acció de la gravetat.
- Floculació: es produeixen agregats de les partícules que tenen més tendència a sedimentar, així les partícules de menor mida també decanten.

- Filtració: els sòlids queden retinguts al passar les aigües a través del conjunt que formen el medi granular, els rizomes, les arrels i les tiges de la vegetació.

Els sòlids en suspensió de naturalesa orgànica que queden retinguts al substrat poden sofrir reaccions de biodegradació que poden accelerar-se en determinades èpoques de l'any, on les temperatures són més elevades. Aquestes reaccions suposen una font extra de matèria orgànica dissolta, la qual pot fer baixar el rendiment en l'eliminació de matèria orgànica dels aiguamolls a l'estiu (USEPA, 2000).

Per evitar el ràpid rebliment dels aiguamolls artificials cal un pretractament abans de que les aigües residuals entrin al sistema que permeti eliminar bona part dels sòlids més grans i sòlids en suspensió.

Matèria orgànica

La matèria orgànica present a les aigües a tractar que es trobi en forma de matèria en suspensió sedimentable seguirà el mateix procés descrit anteriorment per als sòlids en suspensió i experimentarà processos de degradació biològica. Aquesta eliminació passa de manera bastant ràpida. Segons (Aguirre P., 2004), quasi la meitat de la DBO_5 s'elimina al passar per els primers metres de l'aiguamoll.

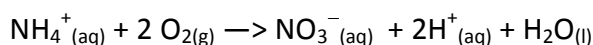
Pel que fa a la matèria orgànica dissolta, intervenen els microorganismes presents a l'aiguamoll, principalment bacteries, que la utilitzaran com a substrat per obtenir energia, creixement cel·lular i síntesis de nous microorganismes. Els processos d'eliminació d'aquesta matèria orgànica variaran en funció del tipus de medi en què es trobi cada aiguamoll, podent trobar condicions aeròbiques, anòxiques o inclús anaeròbiques.

Nitrogen

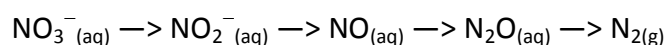
A les aigües residuals urbanes que normalment s'han de tractar, el nitrogen es troba fonamentalment en forma d'amoni i també com a nitrogen orgànic. Normalment no s'haurien de trobar grans concentracions de nitrats i nitrats.

Als aiguamolls artificials, el principal mecanisme d'eliminació del nitrogen és a través dels microorganismes, i consisteix en la nitrificació seguida de la desnitrificació. No obstant això, no és l'única manera per la qual pot eliminar-se, ja que també es pot dur a terme mitjançant l'adsorció de l'amoni i l'assimilació realitzada per les plantes, amb una posterior sega periòdica. Per exemple, s'ha estudiat que per mitjà de l'assimilació per part de les plantes pot eliminar-se un 15- 20% del nitrogen en forma d'amoni. Tot i això, aquest pot ser un procés reversible depenent de les condicions canviants del medi. Altres vies molt menys importants poden ser la volatilització de l'amoni o l'assimilació per part dels microorganismes. Com que el principal mecanisme és la nitrificació/desnitrificació cal fer esment del procés, explicant de forma resumida els passos que se segueixen.

La nitrificació és realitzada per bacteries autòtrofes aeròbiques que aprofiten el poder reductor de l'amoni i aquest és convertit a nitrat. Per dur a terme aquest procés es necessita una bona taxa de transferència d'oxigen dins de l'aiguamoll. Per aquesta raó, la nitrificació es produeix de forma més eficient als AFSSV que als AFSSH. Cal remarcar que en els AFSSV la nitrificació pot arribar a ser total. La reacció que porten a terme és la següent:



Posteriorment, el procés de desnitrificació permet eliminar el nitrat format a la nitrificació convertint-lo a nitrogen gas. Aquest procés només succeeix en condicions d'anòxia i quan hi ha matèria orgànica present ja que és realitzat per bacteries facultatives heteròtrofes. És per aquesta raó que la desnitrificació és molt més eficaç en els AFSSH. El procés que es duu a terme engloba els següents passos:



En conseqüència, la combinació en un sistema híbrid d'un AFSSV seguit d'un AFSSH permet aconseguir rendiments molt més elevats d'eliminació de nitrogen.

Fòsfor

En les aigües residuals urbanes, el fòsfor es pot trobar tant en compostos orgànics com en forma d'ortofosfats inorgànics o fosfats complexes.

L'excés d'aquest nutrient s'elimina als aiguamolls artificials principalment de les següents maneres:

- Absorció directa mitjançant la vegetació plantada (incorporació en forma de nutrient).
- Absorció/adsorció sobre els diferents substrats, tenint en compte que n'hi ha de més eficaços que altres.
- Precipitació, mitjançant diferents reaccions amb el ferro, alumini i calci present a l'aigua, formant fosfats insolubles.

Cal remarcar que l'absorció del fòsfor per part de les plantes és bastant menor que la de nitrogen. Per això, en aquest cas són els processos fisicoquímics els predominants en l'eliminació del fòsfor. Tot i això, una altra via d'eliminació menor és la immobilització microbiana (Tang X.Q. et al., 2009).

Patògens

Els mecanismes més destacats pels quals s'eliminen són els següents:

- Adsorció sobre partícules del substrat.
- Toxicitat que pateixen provocada per certes substàncies produïdes per les arrels de les plantes.
- L'acció depredadora de bacteriòfags i protozous.
- Condicions adverses que en dificulten el creixement (manca d'oxigen dissolt, en el cas de microorganismes aerobis, pH extrem, etc).

De la mateixa manera, en els AFS s'intenta que la làmina d'aigua estigui en contacte amb la llum solar per tal que aquesta ajudi a higienitzar l'aigua, i ajudar a eliminar alguns organismes com coliformes fecals. (García J. et al., 2004).

4.2.6 Aiguamolls artificials per eliminar contaminants específics

A l'apartat anterior s'han exposat els mecanismes més importants mitjançant els quals s'eliminen de les aigües residuals els contaminants més comuns. A continuació, es dedica aquest punt del projecte a explicar la capacitat d'aquests sistemes per a tractar i eliminar altres contaminants que no s'han considerat històricament, però que tenen una problemàtica associada especialment significativa. És per aquesta raó que, tot i no ser quantificats durant aquest projecte (al no ser un dels objectius proposats), es considera important incloure'ls en aquest apartat del ja que al tractar aigües residual provinents d'un centre tecnològic, on s'experimenta al laboratori en diferents àmbits, és possible que aquests contaminants puguin estar presents a l'aigua residual a tractar, i per tant, seria un punt a tenir en compte per a futures experimentacions (fora de l'abast d'aquest projecte).

Contaminants emergents

Com a conseqüència de l'evolució constant de la tecnologia, cada cop hi ha més productes nous al mercat destinats a múltiples finalitats. Un cop utilitzats, les restes d'aquests productes o els seus metabòlits secundaris es converteixen en residus, i són abocats a les aigües residuals. Tots aquests contaminants d'origen antropogènic són diferents dels que normalment s'han considerat al tractament biològic convencional de depuració d'aigües. Dintre d'aquest grup podem incloure els anomenats contaminants emergents, substàncies detectades en els sistemes aquàtics gràcies a la millora de les tècniques i instrumentació analítica. Per exemple poden ser tensioactius presents als detergents, productes farmacèutics, d'higiene i de cura personal, drogues, etc (García J. i Corzo A., 2008).

Alguns contaminants emergents es caracteritzen per presentar una velocitat de transformació cap als seus metabòlits secundaris elevada, així com una introducció continuada al medi natural (Barceló D., 2003); alguns d'ells o els seus metabòlits secundaris presenten una baixa biodegradabilitat i/o inclús cert grau de toxicitat, de

manera que són difícilment eliminables de l'aigua residual mitjançant un tractament biològic convencional, sent necessari proposar tractament alternatiu per aconseguir la seva eliminació del medi. Encara que de moment són contaminants no regulats per la legislació, donada la circumstància que no es té gaire informació dels seus efectes sobre la salut humana, l'ecosistema o la forma d'eliminar-los, a mesura que es van fent estudis es van obtenint més dades, també en el camp dels aiguamolls artificials (García J. i Corzo A., 2008).

Segons alguns estudis realitzats en el camp dels aiguamolls artificials, alguns dels compostos més abundants a l'aigua residual urbana analitzada són l'ibuprofè, la cafeïna i el metildihidrojasmonat, degut al seu ús habitual. L'eliminació d'aquests productes pot arribar a ser del 80% en eficiència, tal i com es demostra en un estudi on es van utilitzar aiguamolls de flux subsuperficial horitzontal amb diferents profunditats. Per aconseguir-ho, Matamoros V. i Bayona J. (2006) van disposar d'una planta pilot amb vuit aiguamolls d'aquest tipus en paral·lel. L'aigua que van tractar era l'equivalent a 200 persones. L'àrea del llit de cada aiguamoll variava entre 54 i 56 m² i el sistema estava plantat exclusivament amb *P. Australis* (Matamoros V. i Bayona J., 2006). No obstant això, l'eficiència d'eliminació depèn del contaminant emergent en concret i pot variar entre el 27% i el 93%, amb una mitjana del 71% (Matamoros V. i Salvadó V., 2012).

Les evidències apunten a que l'eliminació dels contaminants emergents probablement té lloc mitjançant:

- Biodegradació que es duu a terme ja sigui per microorganismes presents als biofilms que es formen entre el medi granular i les arrels i rizomes de les plantes, o ja sigui per incorporació com a font de carboni per a les plantes en el cas d'aquells compostos relativament biodegradables, ja que la disminució del temps de residència està directament relacionada amb la disminució de la eliminació (Matamoros V. i Bayona J., 2006).

- Adsorció parcial dels contaminants poc biodegradables en determinades parts de les plantes. Aparentment un aiguamoll més superficial resulta més eficient en l'eliminació que un de més profund (Matamoros V. i Bayona J., 2006). Per altra banda, les fragàncies analitzades per Matamoros V. i Bayona J. (2006) són eliminades bàsicament per retenció al llit de graves; això s'atribueix a les interaccions hidrofòbiques entre la matèria orgànica i el biofilm.

Recentment s'han realitzat estudis amb bons resultats sobre la eliminació de químics que produeixen disfuncions i malalties en el sistema endocrí en AFS, tot i que encara falta continuar fent recerca en aquest sentit (Ghermandi A. et al., 2007).

Metalls pesants

Els metalls pesants són un dels contaminants que més problemàtica té associada. Poden estar presents al nostre entorn en concentracions relativament elevades, per exemple com a producte de contaminació per lixiviats industrials o productes sanitaris.

Per tant, aquesta acumulació al medi ambient suposa una exposició de significativa preocupació degut als seus efectes sobre la cadena alimentaria, i en conseqüència, sobre animals i la salut humana (Nihla A., et al., 2011).

Els metalls i metal·loides són eliminats en diversos graus depenent del tipus d'aiguamoll construït. Segons Nihla A. i col·laboradors (2011), l'aiguamoll horitzontal de flux subsuperficial té més eficiència en l'eliminació d'aquests contaminants si el comparem amb el vertical de flux subsuperficial.

Els estudis coincideixen en que les taxes d'eliminació decreixen seguint la següent relació d'elements metàl·lics:

$$\text{Hg} > \text{Mn} > \text{Fe} = \text{Cd} > \text{Pb} = \text{Cr} > \text{Zn} = \text{Cu} > \text{Al} > \text{Ni} > \text{As}$$

De forma general, les taxes d'eliminació són superiors al 70%, particularment en els sistemes dominats per *P.australis* (Kropfelova L. et al., 2009).

Una de les formes més eficients d'eliminació de metalls pesants és la fitoextracció, per la qual les plantes macròfites extreuen els elements metàl·lics del sòl acumulant-los al seu interior. L'èxit d'aquesta tècnica recau en dues premisses bàsiques. Per una banda, la producció adequada de biomassa per part de la planta, i, per altra banda, una eficient transferència dels metalls des de les arrels fins a la part aèria, on poden eliminar-se de forma natural amb la caiguda de les fulles o la sega (Bragato C. et al, 2009). Cal remarcar que sense una bona sega planificada els metalls poden tornar a passar a l'aigua si les fulles cauen i es descomponen al seu damunt. La transferència no és molt bona durant una bona part de l'any (Nihla A., et al., 2011), però augmenta durant el període de senescència. Durant aquest procés, la planta agafa els elements que pot utilitzar de les fulles i acumula en elles les substàncies que s'han d'eliminar com ara els metalls pesants. Per tant, per a maximitzar l'eliminació cal segar la planta en el moment de màxima acumulació a la part aèria, just després de la senescència abans que la fulla caigui (Bragato C. et al, 2009).

Altres formes mitjançant les quals s'eliminen els metalls als aiguamolls artificials són la sedimentació i precipitació al substrat. Això pot demostrar-se a partir d'estudis com ara els de Calijuri M.L. i col·laboradors (2011), on es comprova que la concentració de metalls als sediments de l'aiguamoll és més gran que la concentració a l'aigua. De la mateixa manera, també disminueix la concentració amb l'augment de la distància al punt d'entrada d'aigua. La sedimentació i la precipitació poden ser afavorides per les plantes macròfites (Mays P.A. i Edwards G.S., 2001).

Per tant, l'acumulació es produeix principalment a les arrels de les macròfites i als sediments, i s'accepta que un major temps de retenció afavoreix l'eliminació dels metalls pesants per aquests mecanismes (Calijuri M.L. et al., 2011).

5.Part experimental

La part experimental en aquest projecte consta bàsicament de dues fases molt diferenciades. En primer lloc, la col·laboració en el disseny i construcció del sistema híbrid d'aiguamolls. I en segon lloc, la col·laboració en la posada en marxa del sistema duent a terme l'anàlisi de les aigües residuals en diferents punts del sistema, realitzats bàsicament per mi de forma autònoma amb l'assessorament dels professionals del centre i la meva tutora.

5.1 Aigües residuals inicials

La posada en marxa i el funcionament del sistema híbrid d'aiguamolls construït durant aquest projecte es durà a terme utilitzant aigües residuals caracteritzades prèviament.

Cal remarcar que les aigües residuals que s'han de tractar en el sistema híbrid desenvolupat en aquest projecte provenen del Centre Tecnològic Leitat. Això significa que les aigües col·lectades provenen tant de l'ús sanitari de l'aigua o el que seria un ús domèstic, com d'un ús experimental al laboratori. S'ha de tenir en compte que hi ha diferents departaments al centre i que, per tant, poden arribar a treballar amb molts compostos diferents que podrien acabar arribant a l'aigua residual.

Actualment, el centre tecnològic disposa d'una depuradora autònoma formada per un sistema de filtració i un tractament biològic de llots actius posterior (integrat per dos reactors successius), fet que li permet arribar a la qualitat desitjada per abocar a llera pública.

En el cas del nou sistema d'aiguamolls, aquestes aigües residuals seran recollides després de passar pel primer filtre (mida de tamís: 10 mm) de la depuradora, un cop ja s'hagin eliminat els sòlids en suspensió més grans. Aquest seria el pretractament que ja s'ha exposat en la introducció, que s'aprofita de la depuradora ja existent. D'aquesta forma es contribueix a un menor reblliment a curt termini del sistema desenvolupat.

5.2 Sistema híbrid d'aiguamolls construït

Un cop realitzada la recerca bibliogràfica, amb tots els conceptes sobre els sistemes d'aiguamolls artificials clars, el disseny va ser consensuat per varis professionals i jo mateix. El disseny final va ser realitzat per Hidroquímia mitjançant el programa Autocat. Això inclou tot el sistema de tubs, graves, bombes, pendent i tot el necessari per a que el sistema funcionés correctament.

La col·laboració principal durant la fase de construcció del sistema híbrid va ser durant l'emplenament dels aiguamolls amb les graves seleccionades i la plantació del canyís.

Segons les dades proporcionades, el sistema construït ocupa una superfície total de 3,6m² amb un desnivell total de 90 cm entre la cota inferior i la superior (del primer al tercer aiguamoll). El sistema es va instal·lar al costat de la depuradora convencional ja

existent per comoditat, amb l'objectiu de disposar més fàcilment de les aigües residuals a tractar i amb un menor cost.

El sistema híbrid d'aiguamolls artificials està integrat pels següents components:

- Pou de captació
- Tanc homogeneïtzador
- AFSSV
- AFSSH
- AFS

La posada en marxa del sistema va tenir lloc el dijous 19 de Juliol i va durar fins al 16 d'Agost (4 setmanes). Posteriorment, quan es considerava que el sistema ja estava relativament adaptat i les plantes havien arrelat, es va continuar operant una altra setmana amb el AFSSV en un altre règim hidràulic.

A continuació, s'exposen les característiques bàsiques de cada aiguamoll construït i del sistema en general.

5.2.1 POU DE CAPTACIÓ

En la figura 3 es pot veure el sistema que s'ha hagut d'acoblar a la depuradora per tal d'agafar l'aigua després de passar pel primer filtre, però abans que entri al primer reactor biològic.



Figura 3. Muntatge per agafar l'aigua residual inicial. Font: Elaboració pròpia.

Aquest sistema (pou de captació), consisteix en un recipient cilíndric de plàstic (d'uns 200L de capacitat) on entra l'aigua residual col·lectada que ja ha passat pel pretractament. Té un sensor de mínims perquè la bomba submergida que hi ha al pou que agafa l'aigua i l'envia al primer tanc d'homogeneïtzació no es quedés mai sense aigua i pogués fer-se malbé. També té un forat a la part superior que funciona com a sortida de l'aigua, i marca el nivell màxim d'aigua al recipient. A part de servir com a recipient per agafar l'aigua abans que caigui a la depuradora convencional, també

funciona com a petit emmagatzematge per si en algun període, com ara alguns dies d'estiu o caps de setmana, baixa molt poca aigua. Com que el recipient és de plàstic i flotava, es va construir un espècie de gàbia de ferro per fixar-lo, tal i com s'observa a la figura 3.

5.2.2 TANC HOMOGENEÏZADOR

Com ja s'ha comentat, l'aigua residual s'agafa després de passar el primer filtre per a sòlids en suspensió grans de la depuradora. Aquesta és transportada fins al tanc d'homogeneïtzació. Aquest és un dipòsit de capacitat fins a 600 litres, tot i que mai funciona ple fins dalt, que es va pintar per tal que no fos translúcid i evitar, així, el creixement d'algues. Gràcies a aquest dipòsit, que funciona com homogeneïtzador de la mostra d'entrada als aiguamolls i com a emmagatzematge d'aigua residual, el sistema d'aiguamolls híbrid pot funcionar també els caps de setmana i festius quan no hi ha ningú al centre i, per tant, l'aportació d'aigua residual seria mínima. En aquest tanc s'hi ha instal·lat una bomba centrífuga submergible que s'utilitza com agitador de l'aigua, una segona bomba que serveix per alimentar el sistema i uns sensors per marcar el nivell mínim i màxim de l'aigua al tanc.



Figura 4. Tanc d'homogeneïtzació.

5.2.3 AIGUAMOLLS ARTIFICIALS

Primer de tot cal destacar, que un cop l'aigua entra al primer aiguamoll circula per gravetat. Abans, però, calen unes bombes que portin l'aigua residual de l'entrada de la depuradora al tanc d'homogeneïtzació i d'aquest al primer aiguamoll. A l'annex III s'hi mostren els plànols realitzats per Hidroquímia a l'hora de dissenyar el sistema.

Tal i com s'ha comentat a l'estat de l'art, fan falta com a mínim dos tipus de granulometria per a construir el medi granular dels aiguamolls. En aquest cas es va escollir una grava de 5-12 mm de diàmetre per a formar la base dels sistemes. La grava de granulometria major, 25-50 mm, s'utilitza per a recobrir les entrades i sortides dels AFSS.

Pel que fa a la vegetació, es va escollir *P.australis* com a única planta del sistema, per les raons també exposades a l'estat de l'art. En total hi ha unes 45 plantes, amb una densitat de 15 unitats per m².



Figura 5. Plantació *P.australis*.

Una altre dada important és el temps de retenció del sistema. En principi s'ha projectat un temps de retenció hidràulic de 15 dies. Com que funcionen tres aiguamolls en sèrie, el temps de retenció de cada un és de 5 dies.

AFSSV

Després del tanc homogeneïtzador, l'aigua és bombejada intermitentment fins a l'AFSSV, on passa a través d'aquest per gravetat.

La seva geometria és cúbica, amb una superfície d'1 m² i un volum total d'1 m³ (sense considerar el volum que ocupen les graves), amb un resguard hidràulic de 5 cm. Com ja s'ha explicat a l'estat de l'art, a la part superior i inferior s'hi col·loca la grava de granulometria més gran i al mig la més petita de base. L'entrada i la sortida de l'aigua es realitza amb una sèrie de tubs ramificats (Figura 6) per aconseguir una millor distribució i recollida de l'aigua; aquestes canonades estan perforades amb forats de 4 mm de diàmetre.



Figura 6. Entrada aigua residual a l'AFSSV.

La profunditat que pot arribar a assolir la làmina d'aigua és d' aproximadament 0,8 metres. Aquest aiguamoll també disposa d'un sistema per a controlar el nivell de l'aigua, i així poder escollir entre treballar inundat o buit. Aquest sistema consisteix en un recipient amb una màniga flexible al seu interior per on surt l'aigua. Segons l'altura a la que es trobi aquesta, es trobarà l'altura de l'aigua a l'aiguamoll artificial.

El sistema d'aiguamolls funciona amb un cabal de 200 L/dia. Tot i que durant les quatre primeres setmanes l'AFSSV treballa inundat per a la seva estabilització i millor adaptació de les plantes, l'aigua és subministrada en règim discontinu, mitjançant quatre injeccions d'aigua de 50 L cadascuna. D'aquesta manera, quan l'AFSSV treballi buit, s'afavorirà l'aireació d'aquest sistema, i per tant, els processos aerobis.

El mecanisme d'injecció d'aigua s'activa quatre cops al dia, a les 8:00h, a les 12:00h, a les 16:00h i a les 20:00h. La seqüència que es duu a terme és la següent, explicada en un exemple. Primer s'activa l'agitació del tanc d'homogeneïtzació a les 11:55h durant quatre minuts. Després a les 12:00h s'activa la bomba que subministra un volum de 50 L al sistema durant tres minuts fins a les 12:03h.

Funcionant amb aquest règim hidràulic, el temps de retenció hidràulic per aquest aiguamoll és del voltant de 1,5 dies.



Figura 7. Aiguamoll de flux subsuperficial vertical. Font: elaboració pròpia.

AFSSH

Seguidament, l'aigua arriba a l'AFSSH per gravetat. L'aigua entra i surt d'aquest aiguamoll mitjançant un tub perforat (4mm de diàmetre de forats) i disposat en horitzontal. D'aquesta manera s'assegura una millor distribució i recollida de l'aigua, que ha de recórrer tota la longitud de l'aiguamoll. La seva geometria és rectangular amb unes dimensions de 82 x 82 x 200 cm d'ample, alt i llarg respectivament. La superfície que ocupa és d'1,64 m² amb un volum total d'1,34 m³ (sense considerar el volum que ocupen les graves) amb un resguard hidràulic de 5 cm. El temps de retenció de l'aigua en aquest aiguamoll és del voltant de 2 dies.



Figura 8. Aiguamoll de flux subsuperficial horitzontal.

Igualment també s'utilitzen els dos tipus de grava, uns 20 cm d'ample de grava més gran a l'entrada i la sortida (12 – 25 mm) ocupant uns 75 cm d'altura de l'aiguamoll. I una grava de diàmetre més petit (5 – 12 mm) que ocupa la resta de l'aiguamoll. També s'han col·locat 3 tubs verticals per a poder controlar el nivell de l'aigua. La làmina d'aigua s'ha disposat uns 5 cm per sota de la superfície del llit granular. Així doncs la làmina d'aigua amb que es treballa té una altura de 0,7 metres.

AFS

Finalment, l'aigua arriba també per gravetat a l'AFS. Per a realitzar aquest aiguamoll s'ha utilitzat un dipòsit igual que el de l'AFSSV. En aquest cas, però, es manté una làmina d'aigua lliure d'uns 6 cm d'altura (amb un resguard hidràulic de 5 cm) i només hi ha grava de la de mida més petita de diàmetres entre 5 i 12 mm (amb una alçada de 75 cm). En aquest aiguamoll, el temps de retenció hidràulic és del voltant de 2 dies.



Figura 9. Aiguamoll de flux superficial.

L'aigua que surt es conduïda per gravetat fins al segon reactor de la depuradora del Leitat, d'on s'abocarà finalment al medi natural.



Figura 10. Vista del sistema híbrid d'aiguamolls artificials complet. Font: elaboració pròpia

5.3 Manteniment i evolució de la vegetació

Cada dia, abans o després de la presa de mostra, s'han de revisar un seguit de paràmetres per garantir el bon funcionament del sistema. Entre els més destacats hi ha la comprovació del quadre elèctric que controla les bombes, correcte funcionament de la bomba i agitador del tanc d'homogeneïtzació, control de l'entrada i sortida d'aigua als diferents aiguamolls, netejar possibles algues a l'aiguamoll superficial, etc.

Des de la posada en marxa del sistema híbrid d'aiguamolls, cada setmana s'ha anat fent un seguiment del creixement i evolució de la vegetació (*P.australis*) plantada al sistema. Aquest seguiment ha consistit bàsicament en comprovar visualment l'estat d'aquestes, realitzar fotografies de les plantes dels tres aiguamolls i mesura de l'altura mitjana de les plantes.

5.4 Paràmetres analítics, mètodes i equips

Abans s'ha anomenat que aquest apartat de la part experimental constava de dues fases ben diferenciades. A continuació s'exposaran els diversos paràmetres fisicoquímics i microbiològics de les aigües residuals que s'han analitzat al laboratori (prenent mostra en diferents punts del sistema híbrid construït), així com els mètodes o procediments que s'han seguit i els equips que s'han utilitzat.

S'ha optat pel següent procediment en la presa de mostra:

- Diàriament (excloent festes i caps de setmana), s'ha agafat mostra de l'entrada al primer aiguamoll i de la sortida de l'últim (dues mostres en total). Els paràmetres que s'han analitzat diàriament han estat el TC, IC, TOC i NT (prèvia filtració de l'aigua). Les primeres dues setmanes també s'analitzava diàriament la DQO, però degut al cost d'aquest anàlisi es va arribar a la conclusió que només amb el TOC ja caracteritzàvem l'evolució de la matèria orgànica.
- Setmanalment (cada dijous, excepte durant la primera setmana), s'ha agafat mostra de l'entrada al sistema i de la sortida de cadascun dels aiguamolls (quatre mostres en total). Els paràmetres analitzats setmanalment han estat, a part del TC, IC, TOC i NT: DQO, DBO₅, pH, conductivitat elèctrica, terbolesa, SS, amoni i fosfat. El nitrat i nitrit, per qüestions relacionades amb la disponibilitat de material, no ha estat possible analitzar-los setmanalment.

5.4.1 Carboni Orgànic Total (TOC) i Nitrogen Total (NT)

El mètode d'anàlisi ha estat proposat per l'equip de professionals del centre tecnològic seguint la norma UNE EN 1484.

Equip utilitzat: TOC-V CSH/CSN de Shimadzu.

Materials i reactius necessaris: Filtres de xeringa de Millipore (PVDF) de mida de porus de 0,45 µm, xeringa, vials de vidre, aigua de qualitat MilliQ, Hidrogenftalat de potassi ($C_8H_5KO_4$), àcid sulfúric (H_2SO_4), carbonat sòdic (Na_2CO_3), bicarbonat sòdic ($NaHCO_3$) i nitrat potàssic (KNO_3).

Descripció anàlisi: El TOC o carboni orgànic total es defineix com la quantitat de carboni que es troba unit a molècules orgàniques mitjançant enllaços covalents, ja sigui dissolt o particulat. Aquest és un paràmetre que freqüentment s'utilitza com a indicador per a la qualitat de les aigües. S'obté de la diferència entre el TC o carboni total i el IC o carboni inorgànic, que s'associa a aquell carboni lligat a compostos inorgànics com ara carbonats i bicarbonats. Per altre banda, el TN o nitrogen total a les aigües és la suma del nitrogen inorgànic en forma de nitrats, nitrats i amoni, i el nitrogen orgànic, tant el dissolt com el que es troba en forma de partícules, sense mesurar el possible nitrogen gas. Alts valors de nitrogen poden ser deguts i causants del procés d'eutrofització.

Tots els reactius abans esmentats són necessaris per al bon funcionament de l'equip que s'utilitza (preparació de rectes patró de TC, IC i NT; quantitat i qualitat de reactius àcids per tal d'acidificar la mostra, aigua Milli-Q per la neteja de la xeringa...) . De forma general sempre estan disponibles, tot i que abans de fer-lo servir cal assegurar-se'n. De la mateixa manera cal comprovar que l'equip disposa de la suficient pressió d'aire i temperatura per al seu bon funcionament.

El més convenient per augmentar el temps de vida de l'equip és que les mostres que s'analitzin no continguin sòlids en suspensió, que podrien obstruir els conductes de l'equip. Per aquesta raó, cal filtrar les aigües residuals amb els filtres de xeringa i introduir-la posteriorment als vials corresponents. Si no s'està segur de l'absència de sòlids en suspensió cal filtrar sempre. Un cop introduïts els vials a la màquina cal seguir els passos indicats per configurar l'equip, que un cop realitzats les anàlisis ens donarà directament els valors de TC, IC, TOC i NT de les mostres. Per ser precisos, doncs, al filtrar la mostra, el que es mesura és el carboni orgànic i inorgànic total que hi ha dissolt a la mostra; el mateix passa amb el nitrogen total, que només es mesura el que hi ha dissolt.

Les unitats en que s'expressen els resultats són mg/L.

5.4.2 Terbolesa

El mètode d'anàlisi ha estat proposat per l'equip de professionals del centre tecnològic.

Equip utilitzat: Turbidímetre LaMotte model 2008.

Materials i reactius necessaris: Aigua de qualitat MilliQ i estàndards comercials AMCO per al calibratge.

Descripció anàlisi: La terbolesa es defineix com la qualitat d'un fluid que té partícules en suspensió que li fan perdre la seva transparència. Generalment està causada per partícules individuals, sòlids en suspensió que són invisibles a ull nu, de forma similar al fum a l'aire. Les partícules en suspensió més petites fan que el líquid, en aquest cas les aigües residuals, apareguin tèrboles.

La mostra que anem a analitzar cal que estigui a temperatura ambient, per tant s'ha de deixar temperar si fos el cas de tenir-la emmagatzemada a la nevera. Cal calibrar l'equip utilitzant els estàndards comercials esmentats anteriorment i seguidament realitzar un blanc amb aigua MilliQ. A continuació ja podem anar introduint les nostres mostres als recipients de què disposa l'equip. Aquests recipients han d'estar nets, sense rallades o altres danys que puguin dificultar la lectura de la terbolesa.

Cal remarcar que aquesta anàlisi pot variar molt segons les característiques de la petita mostra que agafis, ja que els recipients són d'uns 10 ml de capacitat. Per aquesta raó cal realitzar cada anàlisi per triplicat.

Les unitats en que s'expressen els resultats són NTU, Nephelometric Turbidity Units.

5.4.3 Sòlids en suspensió

La determinació d'aquest paràmetre s'ha realitzat seguint el procés de l'"Standard Methods 2540 D" (APHA 1992).

Equip utilitzat: Equip de filtració al buit.

Materials i reactius necessaris: Filtres de fibra de vidre (de 2,7µm de mida de porus), estufa d'assecat, balança analítica, plaques de petri o vidre de rellotge, aigua de qualitat MilliQ, provetes i pinces.

Descripció anàlisi: En aquesta anàlisi es vol comprovar la quantitat de sòlids en suspensió presents a la mostra d'aigua residual, que poden ser separats per filtració a través d'un paper de filtre estandarditzat. Les mostres s'han de trobar a temperatura ambient en el moment de realitzar-lo. Preferentment s'ha de realitzar aquesta anàlisi abans de passades 4 hores des de la presa de les mostres. El procediment a seguir és el següent. En primer lloc cal pesar totes els filtres, anotar els pesos i posar-los a un recipient adequat per posar a l'estufa, de forma numerada. A continuació es posa cada filtre a l'equip de filtració i es fa passar un petit volum d'aigua destil·lada per humidificar-lo. Seguidament es fa passar un volum determinat d'aigua residual que assegurí la presència de residu suficient al filtre. Cal homogeneïtzar la mostra abans de filtrar per resuspendre els sòlids que hagin sedimentat. Normalment s'utilitza un volum de 100 mL, però en algunes mostres amb pocs sòlids en suspensió pot arribar a fer-se amb 500 mL. Després es fan passar 20 mL d'aigua MilliQ dues vegades, tant per la

proveta com per l'equip de filtració per acabar d'arrossegar els sòlids que poden quedar per les parets. S'extreu el filtre de l'equip amb les pinces i es torna a col·locar al suport numerat. Seguidament es posen a l'estufa a 105 °C entre 1 i 16h per eliminar definitivament la presència d'aigua que pot produir errors en els resultats. Com que només es filtra una petita part de cada mostra (alíquota), pot ser que no copsem del tot correctament la quantitat de sòlids en suspensió (falta d'homogeneïtzació de la mostra). Per aquesta raó cal realitzar l'anàlisi de cada mostra per triplicat. Un cop traiem els filtres de l'estufa, s'han de deixar refredar en un dessecador, pesar i anotar el pes de cadascun amb el residu filtrat.

Els sòlids en suspensió presents a la mostra es calculen mitjançant la fórmula següent:

$$SS = \frac{1.000.000 \cdot (b-a)}{V}$$

On SS és el contingut de sòlids en suspensió en mg/L, *b* és la massa del filtre després de la filtració en g, *a* és la massa del filtre abans de la filtració i V és el volum mostrejat en mL.

5.4.4 Laminocultius

El mètode utilitzat per a la realització d'aquesta anàlisi ha estat proporcionat pel departament de microbiologia del centre tecnològic Leitat. És una anàlisi semi-quantitativa

Equip utilitzat: Incubador (37°C).

Materials i reactius necessaris: Laminocultius amb dos medis de cultiu per a la detecció de Flora total/ Enterobacteris (Schalarb).

Descripció anàlisi: Els laminocultius són sistemes pràctics, estudiats i dissenyats especialment per a la determinació quantitativa i qualitativa dels microorganismes en tots aquells sectors productius en els quals és necessari el control dels microorganismes contaminants. La immersió d'aquests medis de cultiu en les mostres líquides permeten que part de les bacteries presents a l'aigua residual s'adhereixin sobre el substrat nutritiu, sent el número de bacteris que s'hi fixen proporcional a la població total de la mostra. La càrrega microbiana de la mostra es determina comparant la densitat de colònies als laminocultius amb un patrons prèviament establerts.

El procediment és molt senzill. S'introdueixen els laminocultius a les mostres d'aigua a analitzar durant un temps menor a cinc segons. Després s'han d'incubar a 37°C durant 24 hores. Finalment s'analitza visualment l'aparició de colònies.

Les unitats en què s'expressen els resultats són u.f.c/mL. (u.f.c significa unitats formadores de colònies).

5.4.5 Demanda Bioquímica d'Oxigen (DBO₅)

Aquesta anàlisi s'ha realitzat seguint les indicacions i procediments proporcionats pels professionals del centre tecnològic, seguint el procediment descrit a Standard Methods 5210 B, (APHA 1992).

Equip utilitzat: Kit format pels capçals d'ampolla OXITOP IS 12 WTW (manòmetres), les ampolles d'incubació, safata d'agitació i incubador a 20°C.

Materials i reactius necessaris: Aigua destil·lada de qualitat MilliQ, inòcul (fangs de depuradora prèviament airejats), solució tamponada de fosfat 1,5N (buffer) (NaH₂PO₄·H₂O), solució de clorur amònic 0,71N (NH₄Cl), solució de clorur de calci 0,25N (CaCl₂), solució de sulfat de magnesi 0,41N (Mg₂SO₄·7H₂O), solució de clorur fèrric hexahidratat 0,018N (FeCl₃·6H₂O), solució d'elements traça la composició dels quals es troba a l'Standard Methods, inhibidor de la nitrificació (solució comercial ATU), solució de glucosa/àcid glutàmic (patró), pastilles de NaOH i micropipetes.

Descripció anàlisi: La demanda bioquímica d'oxigen mesura la quantitat d'oxigen que necessiten els microorganismes per a oxidar la matèria orgànica així com algunes espècies inorgàniques (com l'ió sulfit, el peròxid d'hidrogen, formes reduïdes de nitrogen, etc.), en un període de 5 dies. La mesura té lloc a pH 6,5-7,5 i a uns 20°C. La DBO₅ s'utilitza per a mesurar la matèria orgànica biodegradable, així que durant l'anàlisi cal intentar minimitzar el consum d'oxigen per part dels microorganismes per a l'oxidació d'espècies inorgàniques.

Un dels primers factors a tenir en compte és que el volum de la mostra total per a realitzar l'anàlisi ve determinat pel rang de DBO₅ esperat. Per estimar aquest valor se suposa que aproximadament el 70% del valor de la DQO és el valor de la mateixa. Resumint, DBO₅ estimada és igual a 0,7 multiplicat per la DQO de la mostra.

Normalment en aquest mètode s'acostuma a treballar amb un volum de mostra total de 164 mL, el rang de mesura del qual és de 0 a 400 mg O₂/L (DBO₅). Si la mostra que es vol analitzar supera aquest rang caldrà realitzar una dilució. També cal tenir en compte que els resultats que obtinguem s'hauran de multiplicar no solament per la dilució realitzada, sinó també per un factor que en aquest volum total de treball és de 10.

Per a calcular les quantitats dels reactius que s'han d'afegir a cada ampolla d'incubació s'utilitza, en aquest cas, un Excel ja programat que pot veure's a l'annex IV. Només cal que introduïm el valor de DQO i ja obtenim la quantitat de reactius a afegir i el volum d'aigua residual restant per arribar al volum total de 164 mL. Cal tenir molt present la importància de realitzar un blanc, que serà aigua qualitat MilliQ i un patró, amb una solució de 150 mg/L de glucosa i 150 mg/L d'àcid glutàmic. També s'ha d'afegir unes gotes d'inhibidor de la nitrificació perquè aquest procés no distorsioni els resultats i unes pastilles de NaOH que reaccionaran amb el CO₂ generat al llarg del procés d'oxidació de la matèria orgànica, assegurant que la variació de la pressió dins l'ampolla sigui causada per la variació d'oxigen.

Finalment, s'han de tapar les ampolles amb el corresponent capçal mesurador i deixar en incubació durant 5 dies a 20°C i amb agitació.

Un cop obtinguts els valors del consum d'oxigen de totes les ampolles, el càlcul de la DBO₅ final s'ha de calcular amb la següent fórmula:

$$DBO_5 = \frac{(DBO_5(\text{mostra}) - DBO_5(\text{blanc})) \cdot V_{\text{total}}}{V_{\text{mostra}}} \cdot f$$

On V_{total} és el volum total contingut a l'ampolla (en aquest cas, 164 mL), V_{mostra} és el volum d'aigua a analitzar que hem hagut d'afegir després dels reactius per arribar a 164 mL, i f és el factor de correcció (10 en aquest cas, com s'ha explicat anteriorment).

Les unitats en aquest cas són mg O₂/L.

5.4.6 Demanda Química d'Oxigen (DQO)

El mètode seguit en la realització d'aquesta anàlisi va ser proposat per l'equip de professionals del centre tecnològic.

Equip utilitzat: Digestor HACH LANGE model HT 200S i Espectrofotòmetre HACH LANGE model DR 3900

Materials i reactius necessaris: Vials de l'empresa HACH LANGE per a calcular la DQO d'una mostra d'aigua residual i micropipeta.

Descripció anàlisi: La demanda química d'oxigen (DQO) determina la quantitat d'oxigen necessària per oxidar per mitjans químics la matèria orgànica de la mostra d'aigua residual, sota unes condicions determinades d'agent oxidant, temperatura i temps. La presència d'espècies inorgàniques potencialment oxidables (com els halurs, el peròxid d'hidrogen, ferro (II), sulfit...) interfereixen en la mesura, de manera que cal minimitzar la seva concentració en la mostra.

Aquesta anàlisi resulta molt senzill gràcies a les noves tecnologies i als materials proporcionats per aquesta empresa. Els vials utilitzats contenen totes les substàncies necessàries per a realitzar l'experiment de la DQO. S'han utilitzat vials de rang entre 15 i 150 mg/L O₂ i vials de rang entre 200 i 1000 mg/L O₂. El procediment que s'ha de seguir és el següent: s'agita el vial per tal d'homogeneïtzar el contingut, a continuació s'afegeixen 2 mL de la mostra d'aigua residual a analitzar; es tapa el vial i s'agita amb precaució, ja que el vidre s'escalfa molt ràpidament. A continuació s'han de posar al digestor en la funció HT (170°C) durant 15 minuts. Després d'aquest temps s'han de deixar refredar i ja es pot mesurar la DQO a l'espectrofotòmetre. Un gran avenç en aquest cas és que tots els vials porten incorporat un codi de barres. Aquest és llegit per l'espectrofotòmetre, que a partir d'això es configura sol i et dona el valor final de DQO de la mostra.

Cal escollir bé quin tipus de vial fem servir, segons el rang de DQO esperada. En tot cas podem realitzar dilucions depenent de quins vials disposem.

Les unitats de la DQO es donen en mg O₂/L.

5.4.7 Nitrats i Nitrits

El mètode d'anàlisi ha estat proposat per l'equip de professionals del centre tecnològic.

Equip utilitzat: Espectrofotòmetre HACH LANGE model DR 3900

Materials i reactius necessaris: Vials de l'empresa HACH LANGE per a calcular els nitrats i els nitrits i micropipeta.

Descripció anàlisi: Aquesta anàlisi és molt semblant al explicat anteriorment per la DQO, però en aquest cas no s'ha de fer digestió. Simplement cal seguir les indicacions que l'empresa distribuïdora ens facilita a la caixa del producte. En principi l'anàlisi s'hauria de realitzar abans de 3 hores després d'haver agafat la mostra. Algun possible interferent en la mesura són els ions de crom. Altres ions també poden interferir però en concentracions bastant més elevades.

Les unitats en aquest cas són mg/L NO₂⁻ i mg/L NO₃⁻, de nitrits i nitrats respectivament.

5.4.8 Fòsfor total

El mètode d'anàlisi ha estat proposat per l'equip de professionals del centre tecnològic.

Equip utilitzat: Digestor HACH LANGE model HT 200S i Espectrofotòmetre HACH LANGE model DR 3900

Materials i reactius necessaris: Vials de l'empresa HACH LANGE per a calcular els fosfats/fòsfor total i micropipeta.

Descripció anàlisi: Aquests vials ens permeten calcular només els ortofosfats (dissolts) de la mostra, si no es realitza la digestió, o el fòsfor total en cas de que si es realitzi. En aquest projecte s'ha optat per mesurar el fòsfor total.

El procediment a seguir també és molt senzill i s'assembla als explicats anteriorment. El fabricant proporciona un full amb l'explicació detallada dels passos a seguir en aquesta determinació.

En aquest cas les unitats són mg/L PO₄-P

5.4.9 Amoni

El mètode d'anàlisi ha estat proposat per l'equip de professionals del centre tecnològic seguint la norma UNE EN 25663.

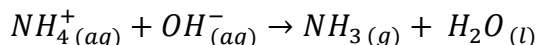
Equip utilitzat: Digestor B'U'CHI model Kjelflex K-360 i valorador METROHM model 719S Titrino (que inclou també un sensor de pH).

Materials i reactius necessaris: Patró de 500 ppm NH₄Cl, solució de HCl 0,1M, tampons de pH = 4 i pH = 7 per calibrar el valorador, pinces, pipeta aforada de 10 mL, pera i recipients de vidre B'U'CHI amb suport, on es duïen a terme les diferents reaccions.

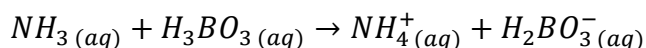
Descripció anàlisi: Per a realitzar l'anàlisi, primer s'ha de preescalfar l'equip i calibrar el valorador. Altres coses molt importants abans de començar és assegurar-se que no hi ha aire en el conducte del valorador i que el patró ens dona correctament. Alguns possibles interferents en els resultats poden ser els nitrats i nitrats.

S'utilitzen 10 mL de mostra d'aigua residual que s'han d'introduir en el recipient apte per a l'equip. Un cop començat el procés, se separa l'amoni de la resta de la mostra afegint NaOH, aigua i temperatura. L'amoni es recull en un recipient on hi ha un medi àcid i es realitzarà una valoració àcid-base amb el HCl que va afegint el valorador.

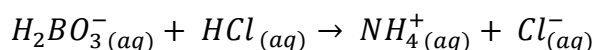
Aquestes reaccions descriuen el procés que realitza l'equip:



Aquest NH₃ en forma de gas puja per la columna de l'equip i després de passar pel condensador torna a la seva forma aquosa. Llavors cau al recipient on s'ha creat un medi bàsic amb l'àcid bòric.



Seguidament es passa a fer la valoració àcid-base amb l'HCl i la base secundària que s'ha format.



Per tant, finalment obtenim els mL d'HCl consumits en la valoració de la mostra d'aigua. Mitjançant uns factors de conversió obtenim finalment l'amoni contingut en l'aigua residual.

$$mL\ HCl \cdot \frac{L\ HCl}{1000\ mL\ HCl} \cdot \frac{0,1\ mols\ HCl}{L\ HCl} \cdot \frac{1\ mol\ H_2BO_3^-}{1\ mol\ HCl} \cdot \frac{1\ mol\ NH_4^+}{1\ mol\ H_2BO_3^-} \cdot \frac{18\ g\ NH_4^+}{1\ mol\ NH_4^+} \cdot \frac{1000\ mg}{1\ g} \cdot \frac{1}{0,01\ L} = 180\ mg/L$$

Aquest factor és el que s'ha de multiplicar pels mL d'HCl per obtenir els valors d'amoni.

Les unitats es donen en mg/L d' NH_4^+ .

5.4.10 pH

El mètode d'anàlisi ha estat proposat per l'equip de professionals del centre tecnològic.

Equip utilitzat: pHmetre CRISON model GLP 21

Materials i reactius necessaris: Aigua de qualitat MilliQ, vas de precipitats i tampons (de pH = 7,00 i pH = 4,01) per a calibrar l'equip.

Descripció anàlisi: El pH és un índex que ens permet mesurar el nivell d'acidesa o alcalinitat d'una solució, en funció de la presència de protons H^+ o hidròxids OH^- a la mostra d'aigua residual. El rang de pH és de 1 a 14, essent 7 el pH neutre. Les mostres més grans de 7 tendiran a ser alcalines o bàsiques i les menors a 7 àcides.

L'anàlisi és molt senzill i ràpid. Cal calibrar l'equip cada dia abans d'utilitzar-lo mitjançant els tampons i seguint les instruccions d'aquest. A continuació només s'ha d'introduir el sensor de pH dins la mostra d'aigua a analitzar i esperar el resultat. És molt important netejar amb aigua el sensor després i abans de cada nova mostra.

El pH no té unitats.

5.4.11 Conductivitat elèctrica (CE)

El mètode d'anàlisi ha estat proposat per l'equip de professionals del centre tecnològic.

Equip utilitzat: Conductímetre CRISON model EC-meter Basic 30+

Materials i reactius necessaris: Aigua de qualitat MilliQ, vas de precipitats i tampons per calibrar l'equip que ens proporciona la mateixa empresa.

Descripció anàlisi: La conductivitat elèctrica (CE) ens permet mesurar la capacitat d'un material, en aquest cas d'una aigua residual, per deixar passar el corrent elèctric a través seu. Aquesta pot estar condicionada per factors físics com la temperatura o per la presència de més sals o cations.

L'anàlisi és molt similar al del pH, però amb un equip diferent. En aquest cas, només cal calibrar una vegada cada 15 dies. Posem el sensor dins de la mostra d'aigua i esperem el resultat. És molt important netejar amb aigua el sensor abans i després de cada mostra per evitar errors en els càlculs.

Les unitats en aquest cas són mS/cm.

6. Resultats i discussió

6.1 Caracterització de l'aigua residual inicial

Abans de començar la construcció del sistema híbrid d'aiguamolls, cap al més de maig, es va realitzar una caracterització de l'aigua residual provinent del centre tecnològic per tal de saber quins valors de referència són els que s'haurien de tenir en compte. Tot i que la mesura dels paràmetres d'aquesta primera caracterització va ser duta a terme pel personal del centre tecnològic, també són uns resultats importants per al desenvolupament del projecte; de manera que s'ha considerat oportú incloure'ls en aquest apartat.

Taula 3. Caracterització fisicoquímica de l'aigua residual inicial. Font: Leitat

Paràmetre analític	Unitats	Valor	Tècniques/mètodes analítics
pH	-	8,32	Potenciometria
Conductivitat elèctrica	$\mu\text{S/cm}$	2.660	Conductimetria
Terbolesa	NTU	53,75	UNE-EN ISO 7027:2001
SST	mg/l	183	UN-EN 872:2005
Olis y grasses	mg/l	3,2	SM 5520B
DQO (no decantada)	mg O ₂ /l	465	UNE 77004:2002
DBO ₅ (no decantada)	mg O ₂ /l	252	SM 5210 B (APHA 1992a)
DBO ₅ / DQO	-	0,54	-
TOC	mg/l	69,8	UNE-EN 1484:1998
TN	mg/l	72,33	
Amoni	mg/l NH ₄ ⁺	78,84	Mètode Kjeldahl
Nitrit	mg/l NO ₂ ⁻	< LD	CI
Nitrat	mg/l NO ₃ ⁻	< LD	CI
Sulfat	mg/l SO ₄ ²⁻	149,5	CI
Clorur	mg/l Cl ⁻	412,01	CI
Fluorur	mg/l F ⁻	< LD	CI
Fosfat	mg/l PO ₄ ³⁻	9,185	CI
Fòsfor total	mg/l P	25,6	ICP-MS
Ferro total	mg/l Fe	1,8	ICP-MS
Na	mg/l	477,25	ICP-MS
Mg	mg/l	8,58	ICP-MS
Al	mg/l	6,32	ICP-MS
K	mg/l	69,9	ICP-MS
Ca	mg/l	20,175	ICP-MS
Mn	mg/l	< 0,1	ICP-MS
Cu	mg/l	< 0,1	ICP-MS
Ba	mg/l	< 0,1	ICP-MS
Li	$\mu\text{g/l}$	< 0,1	ICP-MS
Be	$\mu\text{g/l}$	< 0,1	ICP-MS
V	$\mu\text{g/l}$	< 0,1	ICP-MS
Cr	$\mu\text{g/l}$	< 0,1	ICP-MS
Co	$\mu\text{g/l}$	< 0,1	ICP-MS
Ni	$\mu\text{g/l}$	< 0,1	ICP-MS
Zn	$\mu\text{g/l}$	< 0,1	ICP-MS
Ga	$\mu\text{g/l}$	< 0,1	ICP-MS
As	$\mu\text{g/l}$	< 0,1	ICP-MS
Rb	$\mu\text{g/l}$	< 0,1	ICP-MS
Sr	$\mu\text{g/l}$	0,4	ICP-MS
Mo	$\mu\text{g/l}$	2,3	ICP-MS

Ag	µg/l	< 0,1	ICP-MS
Cd	µg/l	< 0,1	ICP-MS
In	µg/l	< 0,1	ICP-MS
Cs	µg/l	< 0,1	ICP-MS
Hg	µg/l	< 0,1	ICP-MS
Tl	µg/l	< 0,1	ICP-MS
Pb	µg/l	< 0,1	ICP-MS
Bi	µg/l	< 0,1	ICP-MS

Taula 4. Caracterització microbiològica de l'aigua residual inicial. Font: Leitat.

Tipus de microorganisme	Mostra escollida para el recompte	Norma aplicada	Colònies observades	Conclusió
<i>Legionella spp.</i>	Diluïda 10 ⁻² y filtrada, sin tractament	UNE-EN ISO 11731:2007	<ul style="list-style-type: none"> • Recompte en placa: >300 cfu / 100µl • Concentració bacteriana (cfu/200ml): >3 x 10⁵ • Concentració bacteriana (cfu/ml): >1,5 x 10³ 	Absència confirmada de <i>Legionella pneumophila</i> y presumpte absència confirmada de altres espècies de <i>Legionella</i>
<i>Escherichia coli</i>	Diluïda 10 ⁻³	UNE-EN ISO 9308-1:2001	<ul style="list-style-type: none"> • Recompte en placa: 112 cfu / 100µl • Concentració bacteriana (cfu/ml): 1,12 x 10⁶ 	Presència de 1,12 x 10 ⁶ cfu/ml de <i>Escherichia coli</i>

6.2 Anàlisis al laboratori

En aquest apartat s'exposen els resultats obtinguts durant les anàlisis al laboratori. La raó per la qual s'ha decidit incloure en aquest projecte els resultats i la discussió de forma integrada, en comptes de fer-ho en dos apartats separats com es fa habitualment, és perquè d'aquesta manera tot llegint la discussió es poden consultar les dades a les taules. Així doncs, resulta més còmode la visualització dels resultats i posterior discussió.

Els resultats i discussió s'han separat en dues parts ben diferenciades, quan l'AFSSV treballa inundat i quan treballa buit, amb les conseqüències que porta implícit.

A més a més, dins de cada part s'han agrupat els diferents anàlisis per grups d'afinitat, essent aquests els referits a la matèria orgànica, els nutrients i altres.

6.2.1 Sistema híbrid funcionant amb AFSSV inundat (DEL 19/7/2012 AL 16/8/2012)

EVOLUCIÓ DE LA MATÈRIA ORGÀNICA

Aquests són els resultats relacionats amb l'eliminació de la matèria orgànica. En aquest cas tindrem en compte el TOC, la DQO i la DBO₅.

Primer de tot es mostren els resultats de les anàlisis diàries i dels dos primers dijous, en què només s'agafava mostra de l'entrada i la sortida. Al començament es realitzava la DQO i el TOC cada dia, però degut al cost que comportaria mesurar diàriament la DQO i que amb el TOC ja es fa un seguiment de l'evolució de la matèria orgànica, va continuar fent-se només el TOC diàriament a partir del 26/07/2012.

Taula 5. Resultats del TOC diari amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.

Dia	TC (mg/L)		IC (mg/L)		TOC (mg/L)		
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida	% Eliminació
19/07/2012	126,7	109,9	75,47	80,26	51,23	29,65	42%
20/07/2012	105,6	106,7	75,56	87,19	29,04	19,54	33%
23/07/2012	84,84	92,47	67,71	77,20	17,12	15,27	11%
24/07/2012	101,7	83,35	73,21	67,75	28,54	15,60	45%
25/07/2012	109,2	78,75	64,22	59,41	45,00	19,35	57%
26/07/2012	205,3	75,14	62,41	57,51	142,90	17,63	88%
27/07/2012	209,2	61,14	84,66	46,48	124,50	14,66	88%
30/07/2012	193,3	97,98	76,81	74,30	116,50	23,68	80%
31/07/2012	142,7	102,7	69,30	71,44	73,40	31,26	57%
01/08/2012	159,4	105,1	63,49	72,41	95,91	32,69	66%
03/08/2012	231,4	100,2	86,69	76,65	144,80	23,53	84%
06/08/2012	127,2	93,03	76,21	76,25	50,97	16,79	67%
07/08/2012	133,3	87,38	79,86	69,49	53,41	17,89	67%
08/08/2012	113,9	88,52	71,72	67,26	42,18	21,26	50%
10/08/2012	99,44	91,00	81,16	70,95	18,28	20,05	-10%

13/08/2012	89,23	87,21	75,06	71,08	14,17	16,13	-14%
14/08/2012	88,02	87,25	72,76	71,64	15,26	15,61	-2%

Taula 6. Resultats de la DQO diària amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.

Dia	DQO (mg O ₂ /L)		
	Entrada	Sortida	% Eliminació
19/07/2012	448	158	65%
20/07/2012	397	57,2	86%
23/07/2012	174	44,6	74%
24/07/2012	205	54,4	73%
25/07/2012	301	59,2	80%
26/07/2012	565	62,5	89%

I a continuació, es presenten els resultats de les anàlisis setmanals (mesurades cada dijous) a partir del 02/08/2012 (inclòs) relacionats amb la matèria orgànica.

Taula 7 i 8. Resultats del TOC setmanal amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.

Dia	TC (mg/L)				IC (mg/L)				TOC (mg/L)			
	Entrada	AFSSV	AFSSH	AFS	Entrada	AFSSV	AFSSH	AFS	Entrada	AFSSV	AFSSH	AFS
02/08/2012	143,9	150,1	149,5	106,6	68,61	92,88	93,93	75,13	75,29	57,22	55,57	31,47
09/08/2012	104,5	120,8	132,1	87,7	67,34	95,32	99,98	67,96	37,13	25,47	32,14	19,80
16/08/2012	74,99	95,91	110,5	88,6	63,04	85,27	95,87	70,65	11,95	10,65	14,64	17,95

Dia	% eliminació TOC respecte entrada			% eliminació TOC respecte aiguamoll anterior		
	AFSSV	AFSSH	AFS	AFSSV	AFSSH	AFS
02/08/2012	24%	26%	58%	24%	3%	43%
09/08/2012	31%	13%	47%	31%	-26%	38%
16/08/2012	11%	-23%	-50%	11%	-37%	-23%

Taula 9 i 10. Resultats de la DQO setmanal amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.

Dia	DQO (mg O ₂ /L)			
	Entrada	AFSSV	AFSSH	AFS
02/08/2012	353	193	166	92,3
09/08/2012	215	146,4	118,8	70,5
16/08/2012	154	104,6	98,2	63,4

Dia	% eliminació DQO respecte entrada			% eliminació DQO respecte aiguamoll anterior		
	AFSSV	AFSSH	AFS	AFSSV	AFSSH	AFS
02/08/2012	45%	53%	74%	45%	14%	44%
09/08/2012	32%	45%	67%	32%	19%	41%
16/08/2012	32%	36%	59%	32%	6%	35%

Taula 11. Resultats de la DBO₅ i relació DBO₅/DQO setmanal amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.

Dia	DBO ₅ (mg O ₂ /L)			DBO ₅ /DQO				
	Entrada	AFSSV	AFSSH	AFS	Entrada	AFSSV	AFSSH	AFS
19/07/2012	315,3	-	-	73,1	0,70	-	-	0,46
26/07/2012	379,4	-	-	31,24	0,67	-	-	0,50
02/08/2012	188,7	156,7	135,7	41,7	0,53	0,81	0,82	0,45
09/08/2012	94,1	83,5	104,3	83,3	0,44	0,57	0,88	1,18
16/08/2012	83,5	52,2	52,1	31,2	0,54	0,50	0,53	0,49

La matèria orgànica és un dels elements principals a eliminar en la depuració convencional, i per tant també en els sistemes híbrids d'aiguamolls artificials com en el cas d'aquest projecte. Un primer factor que s'ha d'apreciar a l'observar els resultats és la gran variació d'aquests a l'entrada, sobretot del TOC. Aquestes variacions poden ser associades a múltiples factors, com per exemple les condicions d'homogeneïtzació del tanc o dels factors climàtics. Durant un temps, aquest tanc que va ser pintat de negre per evitar que la llum hi entrés i per tant, que si formessin algues dins, restava amb la tapa tancada i amb un nivell d'afluent bastant alt (uns 600mL). El problema va ser que en el moment d'obrir-lo per agafar mostres feia molta pudor, sobretot a àcid sulfhídric, indicatiu clar de fermentació anaeròbica. Aquesta també podria ser una hipòtesi per explicar alguns valors de matèria orgànica especialment baixos a l'entrada del sistema. No obstant això, s'observa una tendència a disminuir en tots els resultats de TOC i DQO a l'entrada del sistema a mesura que s'avança en el temps. Això s'explica fàcilment amb el fet que a l'agost es redueix molt la plantilla del centre tecnològic, i per tant, tant la quantitat d'aigües residuals produïdes, com la concentració de contaminants que s'hi troben..

Després d'aquestes puntualitzacions, observant els resultats queda clar que el sistema híbrid d'aiguamolls és bastant eficient en l'eliminació del carboni orgànic dissolt total, tenint en compte que en aquest anàlisi la mostra es filtra i per tant les partícules no són considerables. El rendiment d'eliminació de TOC varia diàriament però, en general, s'obtenen reduccions superiors al 40% (arribant en alguns casos fins i tot al 88%), excepte en casos concrets, com per exemple, els últims tres dies de la taula 4, en què el TOC augmenta al final del sistema. La hipòtesi més probable és que aquest augment respon a una forta pluja que es va produir el dia 9 d'agost, cap a les 13h. El sistema, sense protecció contra l'aigua de la pluja, va quedar desbordat d'aigua i la circulació era molt més ràpida, impeding una millor eliminació del carboni total. Per als dies 13 i 14 aquest factor segurament es veu agreujat per les algues presents a l'AFS.

Cal destacar, com mostren les taules 7 i 8, que l'AFSSV presenta una eficiència d'eliminació de carboni orgànic dissolt major a la del AFSSH, en el qual pràcticament no té lloc l'oxidació d'aquest, ja que treballa en condicions més anòxiques o anaeròbiques que en l'AFSSV durant els primers dies. Així mateix, l'eliminació de matèria orgànica en el tercer aiguamoll (AFS) presenta en general elevats rendiments, els quals es podrien explicar per l'ecosistema creat en aquest aiguamoll. Alguns valors estranys més grans del que serien esperables poden ser deguts a la creixuda d'algues a

l'aiguamoll superficial (es comença a observar el seu creixement a partir del dia 24 de juliol), segurament distorsionant alguns valors com ara SS o el propi TOC.

Pel que fa a la DQO, als inicis de la posada en marxa del sistema (19-26 de juliol) s'aconsegueixen rendiment molt bons en quant a la seva reducció, de l'ordre del 75% o inclús superiors (Taula 6); posteriorment aquests rendiment disminueixen a mesura que avança el temps (Taula 10). No obstant això, s'ha de recordar que l'AFSSV treballa inundat. Així doncs, l'eficiència d'eliminació tendeix a descendir a mesura que passa el temps i cada cop hi ha menys oxigen disponible en aquest aiguamoll, i per tant, gradualment disminueixen els processos aerobis que tenen lloc en aquest. Caldrà comparar aquests resultats amb els obtinguts quan el sistema treballa amb l'AFSSV buit.

Finalment, la relació DBO_5/DQO marca la biodegradabilitat de les aigües residuals. Quan la relació és igual o superior a 0,5 es considera que les aigües són biodegradables (Metcalf i Eddy, 2003). Per tant, segons els resultats ens indiquen que aquesta aigua residual ho és, i a mesura que avança en el sistema augmenta la relació en gairebé tots els casos. Una possible hipòtesi, tal i com corrobora la DQO, explica que a mesura que avança l'aigua pel sistema, la matèria orgànica s'oxida i es va convertint en molècules més senzilles i biodegradables, per això augmenta la relació entre la DBO_5/DQO . A l'AFS aquesta relació disminueix una mica, tot i que segueix sent alta, perquè molta matèria orgànica ja s'ha eliminat quedant més fracció de matèria orgànica persistent. Hi ha un cas en què s'obté un valor de $DBO_5/DQO = 1,18$, que podria ser degut a un error experimental en el moment de la realització de l'anàlisi o bé a la presència de compostos inorgànics potencialment oxidables pels microorganismes que utilitzem durant la DBO_5 , com per exemple l'àcid sulfhídric, que donen lloc a que la DBO_5 sigui més elevada de la que s'obtindria si només fos deguda a la oxidació de la matèria orgànica.

EVOLUCIÓ DELS NUTRIENTS

Seguidament s'exposen els anàlisis relacionats amb l'eliminació dels nutrients de les aigües residuals. En aquest cas s'inclouen el nitrogen total o NT (suma d'amoni, nitrat, nitrit i nitrogen orgànic), l'amoni, el fòsfor total i els nitrats i nitrits. El nitrogen total es va analitzar cada dia, mentre que tots els altres paràmetres només setmanalment els dijous.

NITROGEN

Els resultats del nitrogen total, sota aquest primer règim hidràulic, es presenten a la Taula 12, 13 i 14, mentre que els d'amoni es mostren a la Taula 15 i 16.

Taula 12. Resultats del NT diari amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.

Dia	NT (mg/L)		
	Entrada	Sortida	% Eliminació
19/07/2012	31,26	14,89	52%
20/07/2012	23,14	14,63	37%
23/07/2012	10,99	15,52	-41%
24/07/2012	14,44	15,03	-4%
25/07/2012	14,76	15,11	-2%
26/07/2012	17,94	14,12	21%
27/07/2012	30,39	11,73	61%
30/07/2012	20,71	6,133	70%
31/07/2012	13,66	6,200	55%
01/08/2012	24,43	5,733	77%
03/08/2012	60,87	6,595	89%
06/08/2012	18,22	8,715	52%
07/08/2012	21,37	6,611	69%
08/08/2012	15,74	6,811	57%
10/08/2012	14,73	7,065	52%
13/08/2012	9,597	10,02	-4%
14/08/2012	10,51	8,831	16%

Taula 13 i 14. Resultats del NT setmanal amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.

Dia	NT (mg/L N)			
	Entrada	AFSSV	AFSSH	AFS
02/08/2012	24,11	22,13	13,74	6,09
09/08/2012	15,51	19,89	17,85	7,22
16/08/2012	8,831	12,23	16,00	10,21

Dia	% eliminació NT respecte entrada			% eliminació NT respecte aiguamoll anterior		
	AFSSV	AFSSH	AFS	AFSSV	AFSSH	AFS
02/08/2012	8%	43%	75%	8%	38%	56%
09/08/2012	-28%	-15%	53%	-28%	10%	60%
16/08/2012	-38%	-81%	-16%	-38%	-31%	36%

Taula 15 i 16. Resultats de l'amoni setmanal amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.

Dia	Amoni (mg/L NH ₄ ⁺)			
	Entrada	AFSSV	AFSSH	AFS
19/07/2012	46,44	-	-	14,40
26/07/2012	135	-	-	15,48
02/08/2012	38,16	34,20	14,40	12,60
09/08/2012	15,12	20,16	16,56	8,28
16/08/2012	126,36	125,64	127,44	109,80

Dia	% eliminació amoni respecte entrada			% eliminació amoni respecte aiguamoll anterior		
	AFSSV	AFSSH	AFS	AFSSV	AFSSH	AFS
19/07/2012	-	-	69%	-	-	-
26/07/2012	-	-	89%	-	-	-
02/08/2012	10%	62%	67%	10%	58%	13%
09/08/2012	-33%	-10%	45%	-33%	18%	50%
16/08/2012	1%	-1%	13%	1%	-1%	14%

En primer lloc, cal remarcar que durant el temps en que l'AFSSV va treballar inundat es van realitzar algunes anàlisis de nitrats i nitrats, tot i que els resultats no es presentin en aquest projecte en forma de taula. Això és degut a que el material necessari per a realitzar-los, vials de l'empresa HACH LANGE per a nitrats i nitrats, s'havien esgotat i l'empresa feia vacances. És per aquesta raó que, tot i que fos interessant per als resultats, només es van poder fer anàlisis de 4 mostres de nitrats i nitrats durant aquest període, corresponent al dia 9 d'agost, per a l'afluent del sistema i per a l'efluent de cadascun dels aiguamolls. Els resultats van donar per sota del límit de detecció de l'anàlisi, tal i com s'exposava també a la caracterització inicial.

De la mateixa manera que passava amb els valors inicials de TOC i DQO, la variació entre valors inicials també és molt gran en els resultats de NT. També s'observa la tendència a la baixa de tots els resultats per les vacances al centre. S'ha de recordar que l'aiguamoll de flux subsuperficial vertical funcionava inundat, per tant la nitrificació (pas d'amoni a nitrat) resulta molt més difícil per la falta d'oxigen; és per aquest motiu que la quantitat de nitrat després de l'AFSSV és menyspreable i l'eliminació de nitrogen en aquest aiguamoll i en l'AFSSH se'n ressent (Taula 13 i 14). No obstant això, s'arriben a aconseguir algunes puntes d'eliminació total de fins al 77 %, segurament més influïdes per algun dels altres mecanismes explicats a la introducció. Les moltes variacions existents podrien explicar-se si la concentració d'oxigen dins els aiguamolls fos canviant, depenent entre d'altres de les condicions climàtiques. Per tant, cal observar que, tot i els problemes amb l'eliminació en els dos primer aiguamolls, sempre acaba disminuint la concentració de NT a l'AFS. Una hipòtesi podria ser la intervenció de les algues, absorbint aquest nitrogen ja sigui en forma d'amoni o nitrats. Per aquest i altres factors es podria explicar també la crescuda d'aquestes massivament.

Molt possiblement la major part del nitrogen a les aigües residuals sigui amoni provinent de la urea (NH₂-CO-NH₂) de l'orina, però amb els resultats obtinguts amb aquesta anàlisi (mètode Kjeldhal) no poden fer-se moltes suposicions, com s'explicarà a continuació. Com s'observa en els resultats, en algunes mostres l'amoni dona més gran que el NT total en el mateix període i, això evidentment no és possible. La hipòtesi que pren més força és un error en els resultats associats a la mesura d'amoni que pot provenir de múltiples factors. Un d'ells és el propi equip de mesura de l'amoni, el qual s'ha de preparar minuciosament per a que funcioni a la perfecció (eliminació de bombolles d'aire en el valorador, per exemple). Un altre pot ser les moltes interferències que poden fer-nos variar els resultats, per exemple, la presència d'urea, nitrat i nitrit o bases que siguin volàtils. Altres poden ser errors humans, o el temps que va transcórrer des de la presa de la mostra fins a la realització de l'anàlisi, tot i que aquesta va restar congelada durant el temps d'espera, no obstant això l'error hagués estat per defecte en aquest cas.

FÒSFOR

Els resultats corresponents al fòsfor total es poden consultar a les Taules 17 i 18.

Taula 17 i 18. Resultats del fòsfor total setmanal amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.

Dia	Fòsfor total (mg/L P-PO ₄ ⁻³)			
	Entrada	AFSSV	AFSSH	AFS
19/07/2012	3,76	-	-	0,89
26/07/2012	3,23	-	-	0,69
02/08/2012	3,35	2,18	1,87	1,14
09/08/2012	2,87	2,29	2,13	1,28
16/08/2012	2,02	2,31	2,26	1,77

Dia	% eliminació P total respecte entrada			% eliminació P total respecte aiguamoll anterior		
	AFSSV	AFSSH	AFS	AFSSV	AFSSH	AFS
19/07/2012	-	-	76%	-	-	-
26/07/2012	-	-	78%	-	-	-
02/08/2012	35%	44%	66%	35%	14%	39%
09/08/2012	20%	26%	55%	20%	7%	40%
16/08/2012	-14%	-12%	12%	-14%	2%	22%

Finalment, un altre nutrient molt important és el fòsfor. A primera vista sorprèn que en la caracterització inicial de l'aigua (Taula 3) el valor fos substancialment més gran que el de l'aigua d'entrada al nostre sistema durant el mes de juliol i agost. La raó més lògica a la qual s'ha arribat és la següent. La caracterització de l'aigua es va realitzar al mes de maig; en aquesta època de l'any dos dels departaments del centre, Detergència i Testing, mitjançant alguns dels seus estudis podrien haver fet incrementar la presència de fòsfor a l'aigua (detergents amb fosfonat i proves de validació amb fosfat). En canvi, durant els mesos en què s'han realitzat les anàlisis de la Taula 17 i 18, aquesta activitat era pràcticament inexistente, d'aquí les diferències tan significatives. Deixant això a banda, l'eliminació del fòsfor resulta satisfactòria, malgrat

que s'observa una tendència a l'augment d'aquest element al llarg del temps al final del sistema. Els últims resultats indiquen que l'aiguamoll més eficient és el superficial, i que als altres els costa més d'eliminar-lo. Una possible hipòtesi seria que els mecanismes pels quals s'elimina el fòsfor, principalment per absorció/adsorció a substrat o plantes, tenen una eficiència més baixa que la del procés que té lloc en l'AFS, el qual eliminaria el fòsfor principalment a través de l'absorció per part de les algues. Sempre s'ha pensat que el creixement d'algues és negatiu, i molts cops porta una gran problemàtica associada, però en aquest cas, amb una eliminació periòdica d'aquestes, es podria aconseguir una bona eliminació del fòsfor. S'ha de tenir en compte que tan sols 1 gram de fosfat-fòsfor (PO₄-P) pot provocar el creixement de fins a 100 grams d'algues. Les concentracions crítiques per a una eutrofització incipient es troben entre 0,1 i 0,2 mg/L de PO₄-P a l'aigua corrent i entre 0,005 i 0,01 mg/L PO₄-P en aigües tranquil·les.

EVOLUCIÓ DELS SÒLIDS EN SUSPENSÍO I TERBOLESA

Seguidament, s'exposaran els resultats dels experiments sobre els sòlids en suspensió i la terbolesa.

Taula 19 i 20. Resultats dels SS setmanals amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.

Dia	SS (mg/L)			
	Entrada	AFSSV	AFSSH	AFS
19/07/2012	194,3	-	-	19
26/07/2012	62,5	-	-	22,7
02/08/2012	100,7	11,6	12,2	30,3
09/08/2012	74	6,9	7,1	14,5
16/08/2012	69	3,7	3,3	17,3

Dia	% eliminació SS respecte entrada			% eliminació SS respecte aiguamoll anterior		
	AFSSV	AFSSH	AFS	AFSSV	AFSSH	AFS
19/07/2012	-	-	90%	-	-	-
26/07/2012	-	-	64%	-	-	-
02/08/2012	88%	88%	70%	88%	-5%	-148%
09/08/2012	91%	90%	80%	91%	-3%	-104%
16/08/2012	95%	95%	75%	95%	11%	-424%

Taula 21 i 22. Resultats de terbolesa setmanals amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.

Dia	Terbolesa (NTU)			
	Entrada	AFSSV	AFSSH	AFS
19/07/2012	72,0	-	-	6,6
26/07/2012	39,6	-	-	3,7
02/08/2012	134,2	10,9	33,5	31,9
09/08/2012	67,3	143,5	181,7	9,4
16/08/2012	17,5	8,75	3,5	3,3

Dia	% eliminació Terbolesa respecte entrada			% eliminació Terbolesa respecte aiguamoll anterior		
	AFSSV	AFSSH	AFS	AFSSV	AFSSH	AFS
19/07/2012	-	-	91%	-	-	-
26/07/2012	-	-	91%	-	-	-
02/08/2012	92%	75%	76%	92%	-207%	5%
09/08/2012	-113%	-170%	86%	-113%	-27%	95%
16/08/2012	50%	80%	81%	50%	60%	6%

Segons les dades proporcionades per aquests resultats, tant els sòlids en suspensió com la terbolesa són eliminats amb molta eficiència pel sistema híbrid construït. Parlant més concretament dels SS, s'observa que l'aiguamoll més eficient és l'AFSSV, mentre que l'horitzontal no fa variar molt la concentració que li arriba. Els mecanismes d'eliminació d'aquests contaminants estan exposats a la introducció. La dada més important a comentar és l'augment d'aquests en l'AFS. La explicació és molt senzilla, es deu bàsicament a les algues presents en aquest aiguamoll. Això es pot demostrar amb el color d'aquests SS que queden retinguts al filtre, completament verds, mentre que a l'entrada són de color marró.

La terbolesa, per la seva banda, també s'elimina bàsicament a l'AFSSV. A part d'algunes variacions dels resultats s'observa una disminució d'aquesta fins i tot a l'AFS. La suposició és que, encara que hi hagin algues que facin augmentar els SS, aquests són d'una mida relativament gran, fet que no intervé en gran mesura en la transparència de l'aigua de sortida. Uns valors molt interessants a comentar són els del dia 9 d'agost. Com ja s'ha comentat anteriorment, aquell dia hi va haver una forta tempesta. Aquest fet probablement va remoure el sistema, actuant com si s'hagués fet una neteja del sistema, fent augmentar de forma substancial la terbolesa.

EVOLUCIÓ DEL pH I DE LA CE

A la Taula 23 i 24 es presenten els resultats sobre l'evolució periòdica i en els diferents tipus d'aiguamolls del pH i de la conductivitat elèctrica, respectivament.

Taula 23. Resultats del pH setmanal amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.

Dia	pH			
	Entrada	AFSSV	AFSSH	AFS
19/07/2012	7,5	-	-	7,39
26/07/2012	7,09	-	-	7,6
02/08/2012	7,64	7,91	7,96	7,86
09/08/2012	7,45	7,76	7,65	7,57
16/08/2012	7,77	7,74	7,67	8,01

Taula 24. Resultats de la CE setmanal amb AFSSV inundat. Font: Elaboració pròpia.

Dia	CE (mS/cm)			
	Entrada	AFSSV	AFSSH	AFS
19/07/2012	26,40	-	-	8,44
26/07/2012	6,14	-	-	17,23
02/08/2012	7,31	7,06	6,09	7,12
09/08/2012	5,37	5,28	4,89	5,87
16/08/2012	2,22	3,30	4,95	5,89

Com es pot observar en la Taula 23, el pH es manté força constant durant el pas de l'aigua pel sistema, mantenint-se proper a la neutralitat (d'aproximadament $7,0 \pm 0,5$). Pot deduir-se una lleugera tendència a l'alça des de l'entrada de l'aigua a la sortida, però res remarcable.

Pel que fa a la conductivitat elèctrica (Taula 24), la disminució del valor a l'aigua d'entrada des del dia 19 de juliol respecte a la resta de dies és molt remarcable, causada pel fet que molt personal del centre tecnològic estigués de vacances, amb les conseqüències sobre l'ús d'aigua, sobretot sanitària, que això comporta. Si es vol mirar una mica més en profunditat, a l'AFS augmenta de forma lleugera en conjunt. Una possible hipòtesi, encara que no demostrada, faria referència a la presència de les algues com a possible causant.

EVOLUCIÓ DE LA FLORA BACTERIANA

Finalment, es dugué a terme una anàlisi semiquantitativa de l'evolució de la flora bacteriana en l'aigua residual a mesura que aquesta anava passant a través dels diferents tipus d'aiguamolls, concretament el dia 16 d'agost.

Els resultats dels laminocultius es mostren en les figures següents. Per qüestió de temps, només s'ha pogut realitzar l'anàlisi de la flora total i d'enterobacteris quan l'AFSSV treballava inundat. Cal recordar que la part vermella era un cultiu per a la flora total, i la part blanca per als enterobacteris.

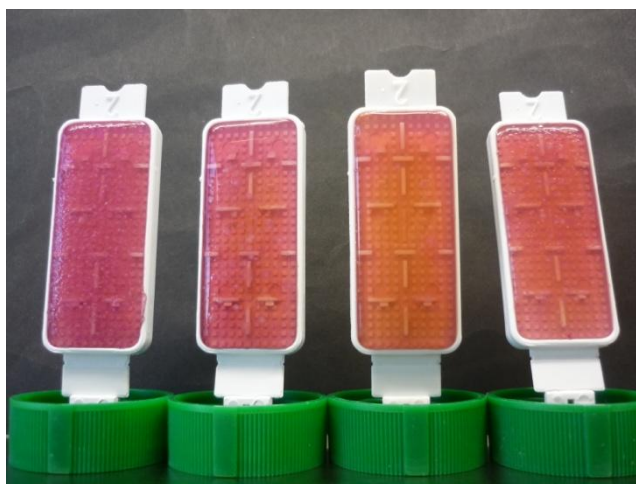


Figura 11. Resultats laminocultius: flora total amb AFSSV inundat. D'esquerra a dreta, els resultats corresponen a: i) aigua d'entrada al sistema, ii) aigua del AFSSV, iii) aigua del AFSSH, iv) aigua del AFS. Font: Elaboració pròpia.

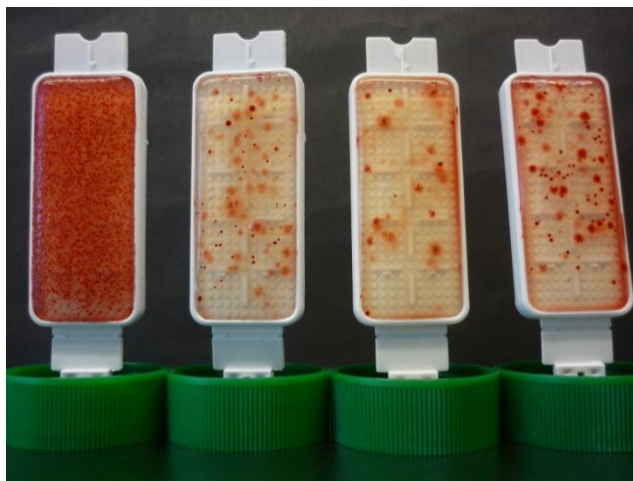


Figura 12. Resultats laminocultius enterobacteris amb AFSSV inundat. D'esquerra a dreta, els resultats corresponen a: i) aigua d'entrada al sistema, ii) aigua del AFSSV, iii) aigua del AFSSH, iv) aigua del AFS. Font: Elaboració pròpia.

Els resultats dels laminocultius estan ordenats a les figures anteriors d'esquerra a dreta de la següent forma: Entrada - AFSSV - AFSSH - AFS.

Segons aquests resultats, els aiguamolls subsuperficials vertical i horitzontal eliminen una elevada quantitat de càrrega d'enterobacteris, mentre que en l'últim aiguamoll augmenta de nou aquesta quantitat. Com s'observa a la figura 11, la flora total no pot diferenciar-se d'un aiguamoll a l'altre. En canvi, sí que pot realitzar-se una determinació semiquantitativa dels enterobacteris presents a l'aigua. Els resultats són els següents:

- Entrada: $> 10^7$ cfu/ml.
- AFSSV: 50.000 cfu /ml.
- AFSSH: 10.000 – 50.000 cfu /ml.
- AFS: 50.000 – 100.000 cfu /ml.

Una possible hipòtesi per explicar aquesta eliminació vindria explicada per el fet que, en general, els enterobacteris són aerobis. No obstant això, n'hi ha alguns que poden créixer en condicions anaeròbiques (anaerobis facultatius). Com que a l'AFSSV i l'AFSSH hi ha baixes concentracions d'oxigen, predominant els processos anòxics o anaerobis, molts moren i resten els anaerobis facultatius. Com que a l'AFS torna a haver-hi condicions aeròbies poden tornar a créixer. Seria interessant realitzar aquest anàlisi un cop buit l'AFSSV, però no ha estat possible per qüestió de temps.

6.2.2 Sistema híbrid funcionant amb l'AFSSV buit (Setmana del 16/08/2012 al 23/08/2012)

Per qüestió de temps, només s'han pogut realitzar anàlisis amb aquesta configuració durant una setmana. Tot i així, podem extreure algunes conclusions positives. De la mateixa manera, no s'han realitzat anàlisis de nitrats i nitrits degut a la falta del material necessari, i de laminocultius per qüestió de temps.

A continuació es fa la mateixa separació entre experiments que a l'apartat a), segons eliminació de matèria orgànica, nutrient i altres.

EVOLUCIÓ DE LA MATÈRIA ORGÀNICA

Per estudiar l'eliminació de la matèria orgànica utilitzarem el TOC, la DQO i la DBO₅. Tenir en compte que el TOC s'ha analitzat cada dia i la resta de paràmetres el dijous dia 23/08/2012.

Taula 25. Resultats del TOC diari amb AFSSV buit. Font: Elaboració pròpia.

Dia	TC (mg/L)		IC (mg/L)		TOC (mg/L)		
	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida	Entrada	Sortida	% Eliminació
17/08/2012	79,48	82,37	68,50	74,42	10,98	7,954	28%
20/08/2012	81,61	72,53	69,23	57,73	12,37	14,80	-20%
21/08/2012	91,06	74,24	68,91	60,88	22,15	13,36	40%
22/08/2012	83,53	71,42	65,96	58,22	17,57	13,21	25%

Taula 26 i 27. Resultats del TOC setmanal amb AFSSV buit. Font: Elaboració pròpia.

Dia	TOC (mg/L)			
	Entrada	AFSSV	AFSSH	AFS
23/08/2012	27,72	8,165	6,422	10,52

Dia	% eliminació TOC respecte entrada			% eliminació TOC respecte aiguamoll anterior		
	AFSSV	AFSSH	AFS	AFSSV	AFSSH	AFS
23/08/2012	71%	77%	62%	71%	21%	-64%

Taula 28 i 29. Resultats de la DQO setmanal amb AFSSV buit. Font: Elaboració pròpia.

Dia	DQO (mg O ₂ /L)			
	Entrada	AFSSV	AFSSH	AFS
23/08/2012	182	66,4	65,6	45,2

Dia	% eliminació DQO respecte entrada			% eliminació DQO respecte aiguamoll anterior		
	AFSSV	AFSSH	AFS	AFSSV	AFSSH	AFS
23/08/2012	64%	64%	75%	64%	1%	31%

Taula 30. Resultats de la DBO₅ i relació DBO₅/DQO setmanal amb AFSSV buit. Font: Elaboració pròpia.

Dia	DBO ₅ (mg O ₂ /L)				DBO ₅ /DQO			
	Entrada	AFSSV	AFSSH	AFS	Entrada	AFSSV	AFSSH	AFS
23/08/2012	94	41,7	31,2	31,2	0,52	0,63	0,48	0,69

S'ha de tenir en compte que, per tal de canviar de configuració, es va buidar tota l'aigua que contenia l'AFSSV. Això segur que va haver de suposar algun impacte al sistema. Les meves hipòtesis apunten a una lleugera destrucció del sistema que s'havia creat dins l'AFSSV, de la mateixa manera que el nou sistema amb condicions d'aireació

total necessita un cert temps per establir-se (fet que amb una setmana potser no es pot arribar a observar). També havia de produir un efecte sobre l'AFSSH i l'AFS, ja el cabal va augmentar significativament durant uns minuts per dins els dos sistemes.

No obstant això, s'observa en conjunt una disminució del TOC força acceptable tot i que lleugerament inferior en les condicions anteriors, amb l'excepció d'un dia. Si s'analitzen les dades del dia 23 d'agost, quan feia una setmana que funcionava el sistema sota aquest nou règim hidràulic, el TOC disminueix de forma brusca a l'AFSSV (71% d'eliminació), essent aquest el més eficient dels tres tipus d'aiguamolls en l'eliminació. El lleuger ascens a l'AFS possiblement és degut a la presència d'algues, les quals poden incorporar carboni a l'aigua per exemple en la seva mort.

En relació amb la DQO, duta a terme a la setmana de funcionament del nou règim hidràulic, els resultats indiquen una eliminació significativa a l'AFSSV. Això concorda amb la recerca bibliogràfica, ja que amb un medi més aerobi, l'oxidació de la matèria orgànica és molt més eficient. S'obté un excel·lent 64% d'eliminació al primer aiguamoll. En canvi, en l'AFSSH l'oxidació de matèria orgànica és poc destacable com a conseqüència de les condicions anòxiques en què es treballa promocionen altres tipus de processos, com podria ser la desnitrificació. Cal destacar que, tot i que en l'AFS augmenti la quantitat de matèria orgànica, aquesta té un grau d'oxidació més alt, com mostra el valor de DQO d'aquest aiguamoll respecte l'anterior.

Pel que fa a la relació DBO_5/DQO , les aigües continuen sent biodegradables. En aquest cas, el conjunt de dades és lleugerament superior a quan l'AFSSV treballava inundat. La suposició indica que, com que el medi d'aquest aiguamoll és més aerobi, es poden oxidar més tots els compostos, fins i tot alguns de més persistents. Donant com a resultat una aigua final una mica més biodegradable.

Així doncs, com a comparativa final es podria dir que l'eliminació de matèria orgànica és superior amb aquesta configuració del sistema.

EVOLUCIÓ DELS NUTRIENTS

A continuació s'inclouen els resultats dels anàlisis relacionats amb l'eliminació dels nutrients de les aigües residuals. En aquest cas s'inclouen el NT, l'amoni, el fòsfor total i els nitrats i nitrits. El nitrogen total s'ha analitzat cada dia, mentre que tots els altres només els dijous dia 23/08/2012.

NITROGEN

Els resultats del nitrogen total, sota aquest segon règim hidràulic, es presenten a la Taula 31, 32 i 33, mentre que els d'amoni es mostren a la Taula 34 i 35.

Taula 31. Resultats del NT diari amb AFSSV buit. Font: Elaboració pròpia.

Dia	NT (mg/L)		
	Entrada	Sortida	% Eliminació
17/08/2012	12,75	8,239	35%
20/08/2012	6,482	4,994	23%
21/08/2012	9,783	6,009	39%
22/08/2012	10,25	5,803	43%

Taula 32 i 33. Resultats del NT setmanal amb AFSSV buit. Font: Elaboració pròpia.

Dia	NT (mg/L)			
	Entrada	AFSSV	AFSSH	AFS
23/08/2012	14,99	18,89	9,597	6,952

Dia	% eliminació NT respecte entrada			% eliminació NT respecte aiguamoll anterior		
	AFSSV	AFSSH	AFS	AFSSV	AFSSH	AFS
23/08/2012	-26%	36%	54%	-26%	49%	28%

Taula 34 i 35. Resultats de l'amoni setmanal amb AFSSV buit. Font: Elaboració pròpia.

Dia	Amoni (mg/L NH ₄ ⁺)			
	Entrada	AFSSV	AFSSH	AFS
23/08/2012	116,28	111,6	115,92	113,4

Dia	% eliminació Amoni respecte entrada			% eliminació Amoni respecte aiguamoll anterior		
	AFSSV	AFSSH	AFS	AFSSV	AFSSH	AFS
23/08/2012	4%	0%	2%	4%	-4%	2%

Començant la discussió pel nitrogen total, s'ha de partir de la base que les dades d'entrada tenen uns valors baixos (Taula 31) comparat amb els de la taula de caracterització inicial degut al ja explicat anteriorment motiu de les vacances. Mirant els resultats, cal destacar que l'eliminació de nitrogen és positiva en tots els casos dels que disposem. El que és remarcable és una certa estabilització dels valors finals i una lleugera tendència a l'alça del percentatge d'eliminació d'aquest (fins a un 54% el dia 23 d'agost). En el cas que s'hagués continuat amb els anàlisis, potser s'esperaria trobar un augment de l'eficiència en l'eliminació.

Si es compara l'evolució de nitrogen total en els diferents aiguamolls (Taula 33), s'observa que la major eliminació té lloc en l'AFSSH, mentre que en l'AFSSV hi ha un lleuger increment respecte al valor inicial. L'augment del NT de l'AFSSV pot venir donat pel factor del moment en què s'agafa la mostra del tanc d'homogeneïtzació (mostra d'entrada). Sovint, després de fer la injecció d'aigua al sistema, el nivell de l'aigua al tanc d'homogeneïtzació queda molt baix i la bomba el torna a omplir. Si la mostra

d'entrada es pren en el tanc homogeneïtzador una vegada aquest s'ha tornat a emplenar amb nova mostra, podem tenir petites diferències entre l'aigua d'entrada i la que es recull a la resta d'aiguamolls, explicant algunes de les petites variacions en els resultats que en principi no tenen molta lògica.

En conseqüència, la suposició que pren més força a l'hora d'explicar l'eliminació de nitrogen és que, després de canviar de configuració, l'AFSSV necessita un cert temps per crear les estructures necessàries per aconseguir aquest objectiu.

Un dels motius principals pels quals s'utilitza aquesta configuració és per afavorir la nitrificació (en l'AFSSV)/desnitrificació (en l'AFSSH), i per tant, l'eliminació de nitrogen. Com ha tingut llocen l'apartat anterior, els resultats de l'amoni no són coherents amb els corresponents al nitrogen total. Després de dur a terme diferents proves i anàlisis repetitives al laboratori per a validar els mètodes utilitzats, es pensa que l'error pot anar associat a la mesura d'interferències (com alguns compostos volàtils) que provoquin que es gastí un volum d'agent valorant durant l'anàlisi superior al que correspondria si només es valorés l'amoni. Aquestes dades, juntament amb les del nitrat que tampoc s'han pogut obtenir, ens mostrarien clarament si, tal i com es cita a la bibliografia, el procés de nitrificació té lloc en l'AFSSV i el de desnitrificació en l'AFSSH i amb quines eficiències. Al no disposar d'elles, només ens queda fixar-nos en la diferència de NT el dia 23 d'agost entre l'AFSSV i l'AFSSH. Aquest 49% d'eliminació es podria associar a la desnitrificació i eliminació del nitrogen que passa a l'aire en forma de gas. D'aquí podríem suposar que en l'AFSSV s'hi produeix el procés de nitrificació.

FÒSFOR

Els resultats corresponents al fòsfor total es poden consultar a les Taules 36 i 37.

Taula 36 i 37. Resultats del fòsfor total setmanal amb AFSSV buit. Font: Elaboració pròpia.

Dia	Fòsfor total (mg/L P-PO ₄ ⁻³)			
	Entrada	AFSSV	AFSSH	AFS
23/08/2012	2,34	1,59	1,55	1,42

Dia	% eliminació P total respecte entrada			% eliminació P total respecte aiguamoll anterior		
	AFSSV	AFSSH	AFS	AFSSV	AFSSH	AFS
23/08/2012	32%	34%	39%	32%	3%	8%

Pel que fa al fòsfor total, presenta valor d'entrada similars als dies anteriors . La lleugera diferència respecte a l'anterior configuració és que la major part del fòsfor és eliminat en l'AFSSV (32%, Taula 37), a diferència del cas anterior en què també hi havia una eliminació important en l'AFS. Una possible explicació és que al fer el buidat del vertical s'hagi arrossegat part del que havia quedat retingut en tot el sistema. Llavors el fòsfor podria eliminar-se millor en aquestes noves condicions per exemple mitjançant el procés d'adsorció al substrat i a les plantes. Tanmateix, caldria tenir continuat operant el sistema per a tenir més anàlisis per a saber la tendència i poder confirmar-ho.

En general, amb les dades de les que es disposa, no podríem assegurar del tot que aquesta configuració funcionés millor a l'hora d'eliminar nutrients, sobretot el nitrogen. Hi ha certs indicis i tendències que així ho apunten, igual que la bibliografia, però caldria estudiar durant més temps el sistema.

EVOLUCIÓ DELS SÒLIDS EN SUSPENSÍO I TERBOLESA

L'evolució dels SS i terbolesa es presenta a les Taules 38-39, i 40-41, respectivament.

Taula 38 i 39. Resultats dels SS setmanals amb AFSSV buit. Font: Elaboració pròpia.

Dia	SS (mg/L)			
	Entrada	AFSSV	AFSSH	AFS
23/08/2012	57,7	62,7	5,3	7,7

Dia	% eliminació SS respecte entrada			% eliminació SS respecte aiguamoll anterior		
	AFSSV	AFSSH	AFS	AFSSV	AFSSH	AFS
23/08/2012	-9%	91%	87%	-9%	92%	-45%

Taula 40 i 41. Resultats de la terbolesa setmanal amb AFSSV buit. Font: Elaboració pròpia.

Dia	Terbolesa (NTU)			
	Entrada	AFSSV	AFSSH	AFS
23/08/2012	68,5	42,43	20	2,5

Dia	% eliminació SS respecte entrada			% eliminació SS respecte aiguamoll anterior		
	AFSSV	AFSSH	AFS	AFSSV	AFSSH	AFS
23/08/2012	38%	71%	96%	38%	53%	88%

L'eliminació dels sòlids en suspensió torna a tenir una eficiència molt gran, de la mateixa manera que amb la configuració anterior (del voltant del 90%). Hi ha una dada que crida molt l'atenció, i és que els SS augmenten a AFSSV respecte l'aigua d'entrada. Això podria estar associat a un error en la recollida de les mostres: quan es va buidar aquest aiguamoll es va produir una certa destrucció del sistema que s'havia creat al seu interior com ja s'ha explicat anteriorment; part dels sòlids que es van resuspendre van quedar emmagatzemats en un tros de tub abans de l'aixeta que permet agafar la mostra. Com que al recollir-la va ser el primer cop que s'obria, aquests SS van incorporar-se a la mostra, esbiaixant els resultats. Tot i així, l'eliminació dels SS en el global del sistema és molt elevada, tot i que es torna a tenir el problema de les algues a l'AFS (i el conseqüent lleuger increment dels SS aportat per aquestes).

Per altra banda, la terbolesa també podria haver-se vist afectada per aquest error però, com mostren els resultats, en menor mesura. En general l'eliminació de la terbolesa segueix el mateix patró que amb la configuració anterior, tot i que sembla

que en superi lleugerament l'eficiència, arribant a valors de més del 95% d'eliminació d'aquesta.

Tenint en compte que només es disposa d'una presa de mostra setmanal en aquesta última configuració, no es pot dir que una configuració superi a l'altre en aquest apartat, sinó que les dues tenen gran eficiència en l'eliminació d'aquest tipus de contaminació de les aigües residuals.

EVOLUCIÓ DEL pH I DE LA CE

A la Taula 42 i 43 es presenten els resultats sobre l'evolució periòdica i en els diferents tipus d'aiguamolls del pH i de la conductivitat elèctrica, respectivament.

Taula 42. Resultats del pH setmanal amb AFSSV buit. Font: Elaboració pròpia.

Dia	pH			
	Entrada	AFSSV	AFSSH	AFS
23/08/2012	7,69	7,72	7,64	8,37

Taula 43. Resultats de la CE setmanal amb AFSSV buit. Font: Elaboració pròpia.

Dia	CE (mS/cm)			
	Entrada	AFSSV	AFSSH	AFS
23/08/2012	1,77	1,78	2,4	3,01

En aquesta configuració, el pH torna a mantenir-se proper a la neutralitat. Com en l'anterior apartat, també acaba pujant una mica en l'AFS, però aquesta pujada no se suposa com a causa del canvi, si no més aviat conseqüència de la presència d'algues i les condicions del medi.

La conductivitat elèctrica també segueix sent molt baixa, tal i com passava amb la configuració anterior. La tendència també és a l'alça, produïda suposadament per la presència d'algues al final del sistema o degut a la interacció al llarg de tot el sistema amb el substrat.

No hi ha canvis remarcables entre una i altra configuració.

6.3 Evolució de la vegetació

En la taula 44 es mostren els resultats obtinguts del seguiment setmanal del creixement de la vegetació.

Taula 44. Resultats evolució vegetació. Font: Elaboració pròpia.

Dia	Vegetació		
	Altura mitjana (cm)		
	AFS	AFSSH	AFSSV
19/07/2012	34	34	32
26/07/2012	39	38	36
02/08/2012	43	42	41
09/08/2012	47	46	46
16/08/2012	51	50	49
23/08/2012	54	55	49

De la tendència de creixement de les plantes de canyís que té lloc en els diferents aiguamolls se n'extreu que les plantes creixen de l'ordre de 4 cm a la setmana. Considerant les condicions extremes que s'han produït aquest estiu, com les contínues altes temperatures, són uns resultats molt acceptables. Com ja s'ha comentat anteriorment en aquest apartat de resultats, fins al dia 16 d'agost, l'AFSSV va estar inundat. Aquesta configuració responia a la necessitat d'estabilització del sistema, i sobretot a la necessitat d'aigua d'aquestes plantes en el moment de plantació, quan més dèbils són. Un cop passat un temps prudencial es va decidir canviar la configuració. De les dades se n'extreu que totes les plantes segueixen creixent al mateix ritme menys les de l'AFSSV que tenen un creixement pràcticament nul durant la última setmana. La falta d'aigua i les altes temperatures fan que el desenvolupament d'aquestes plantes sigui molt més complicat. Tot i presentar un aspecte més sec, hi ha moltes plantes que visualment es veuen en bones condicions.

A part d'aquest paràmetre, les plantes han seguit un bon ritme d'expansió, tant longitudinal com horitzontal i en l'actualitat ocupen quasi bé tota la superfície dels aiguamolls. De seguir així no hi haurà cap problema amb la seva adaptació, per tant aquest és un factor que no influirà negativament en l'evolució del sistema híbrid d'aiguamolls.

L'evolució de la vegetació es pot observar de manera visual a les fotografies de l'annex V, ordenades cronològicament.

7. Conclusions

L'objectiu principal d'aquest projecte, dit en poques paraules, era la posada en marxa d'un sistema híbrid d'aiguamolls artificials. Amb gran satisfacció puc dir que aquest objectiu s'ha complert. Cal remarcar aquest aspecte, ja que han estat molts els condicionants inicials que han anat endarrerint la realització del mateix i, per tant també condicionant-lo. No obstant això, s'ha aconseguit que el sistema híbrid redueixi de mitjana una elevada quantitat de diferent tipus de contaminants (DQO, TOC, NT, fòsfor, SS, terbolesa i enterobacteris), tal com s'exposa als resultats i discussió.

Aquest objectiu principal també incloïa la peculiaritat d'aconseguir un sistema més compacte, que no necessités tanta superfície per al seu funcionament. Això encara no s'ha aconseguit en aquesta fase inicial ja que, encara que la superfície total del sistema no supera els $3,6 \text{ m}^2$, en l'AFSSV s'elimina una mitjana de $6 \text{ g DBO}_5/\text{dia}$ en una superfície d' 1 m^2 quan s'hauria d'arribar a poder eliminar $40 \text{ g DBO}_5/\text{dia}$ amb $2,5 \text{ m}^2$ segons Cooper i col·laboradors (2005); una cosa semblant passa amb l'AFSSH, que elimina una baixa quantitat de matèria orgànica. Aquests resultats poden estar associats a diversos punts dèbils del projecte. En primer lloc la qüestió del temps. Degut als problemes inicials, el temps total d'anàlisi de les aigües residuals i observació de l'evolució del sistema s'ha limitat a 6 setmanes. S'hauria de seguir amb els experiments per tal de veure si a llarg termini augmenten o acaben disminuint, per exemple pels problemes de rebliment, les eficiències d'eliminació d'alguns contaminants. Un altre factor és que durant una part de les anàlisis la plantilla de professionals del centre tecnològic Leitat s'ha vist reduïda degut a les vacances estivals. Aquest fet condiciona l'aportació de contaminants a les aigües residuals, tant d'ús sanitari com dels laboratoris d'investigació. Tanmateix el factor més important és que només s'està fent passar un cabal de $200 \text{ L}/\text{dia}$ per aquest sistema híbrid. Això vol dir que l'eficiència d'eliminació de contaminants durant aquesta fase inicial podria ser considerada correcta per aquestes quantitats d'aigua i concentració inicial de contaminants, però no es pot saber què passaria amb un cabal molt més gran; potser s'hauria d'augmentar la superfície i el volum del sistema híbrid, o buscar alternatives com incrementar el nombre de plantes o canviar el tipus de material de replè. Per tant, tot i que el sistema en principi dóna bons resultats, s'ha de tenir en compte tots aquests factors que limiten la capacitat per treure conclusions exactes.

Finalment, acabant amb l'objectiu principal, les aigües de sortida del sistema híbrid d'aiguamolls haurien de complir la normativa en matèria d'abocament d'aigües residuals, tant a una depuradora com al medi natural. L'efluent del sistema híbrid compleix els límits marcats en el Decret 130/2003, pel qual es podria acabar de tractar aquesta tipologia d'aigua en una EDAR; així mateix, també compleix els diversos paràmetres (DQO, SS, fòsfor i nitrogen total) per a poder ser abocat en llera pública (UE 1991), a excepció de la quantitat de DBO_5 , el límit de la qual és $25 \text{ mg O}_2/\text{L}$, mentre que durant les dues últimes setmanes de funcionament el seu valor estava al voltant dels $30 \text{ mg O}_2/\text{L}$. Aquest fet indica que, tot i que el sistema presenta un elevat potencial de depuració, encara ens trobem en un estadi inicial que cal seguir millorant.

Només l'amoní presenta valors molt elevats durant les dues últimes setmanes, però ja s'han explicat els motius als resultats i discussió. En aquest cas ens trobem amb les mateixes limitacions exposades anteriorment, però no hi ha dubte que el sistema té la capacitat de depurar l'aigua.

El sistema havia de treballar amb l'AFSSV inundat durant un determinat període de temps al principi per a estabilitzar-lo i afavorir el desenvolupament de les plantes. Per això es va decidir que s'intentaria comparar el funcionament del sistema entre ambdues configuracions (inundat i buit).

Analitzats els resultats es poden extreure les conclusions següents. Quan el sistema està configurat amb l'AFSSV buit, les eficiències en l'eliminació de matèria orgànica tendeixen a ser superiors. Pel que fa a la reducció de nutrients, els resultats obtinguts durant l'última setmana farien pensar que el sistema també funciona millor amb aquesta última configuració. Així s'indicava a la bibliografia en el cas del nitrogen, tot i que els resultats obtinguts no permeten confirmar-ho amb rigorositat. En la resta d'anàlisis realitzats no hi ha grans diferències entre les dues configuracions. Per tant, *a priori*, semblaria que el sistema híbrid d'aiguamolls obté millors eficiències d'eliminació globals funcionant amb l'AFSSV buit.

Seguint amb objectius secundaris, la integració dins el grup de professionals del centre tecnològic Leitat en la recerca d'informació, disseny i construcció ha estat una gran experiència des de molts punts de vista i m'ha permès aprendre molt durant la realització del projecte. Des dels mètodes més eficients per a la recerca d'informació, la manera de treballar en grup dins el món laboral real, fins a multitud de tècniques d'anàlisi al laboratori. Tots aquest coneixement adquirits, a part d'ajudar-me a la realització del present projecte, de segur que també em serviran en un futur dins el món laboral. Seguint en aquesta línia, un aspecte important d'aquest projecte és que la realització dels anàlisis al laboratori ha estat pràcticament duta a terme de forma autònoma. Aquest permet encarar algunes situacions difícils que de ben segur em serviran en el futur. Encara que aquest aspecte no tingui molt a veure amb l'objectiu principal, que era la posada en marxa del sistema híbrid d'aiguamolls, m'agradaria destacar-ho perquè crec que aquest projecte m'ha aportat molt més del que jo esperava un cop vaig prendre la decisió d'iniciar-lo.

Per concloure, s'ha confirmat el que apuntava la bibliografia en què aquests sistemes híbrids d'aiguamolls poden ser un substitut als tractaments convencionals de depuració de les aigües residuals. Tanmateix amb algunes limitacions i un llarg recorregut que encara s'ha de seguir en aquest camp de la investigació. Projectes com aquest, que suposen l'inici d'un projecte més gran, poden ajudar a sumar en l'objectiu que ha de ser crear un món més sostenible.

8.Recomanacions i propostes de millora

Un cop finalitzat el projecte és necessari realitzar un exercici d'autocrítica per tal de contribuir a millorar i evitar errors en possibles projectes futurs.

El primer punt on es pot millorar el sistema és al tanc d'homogeneïtzació. Per tal que la llum del Sol no penetres dins seu es va pintar de negre, però no es va tenir en compte l'augment de temperatura al seu interior, agreujada per les altes temperatures durant el període d'anàlisi. Això pot haver provocat una digestió anaeròbica al seu interior, amb dues conseqüències importants. Per una banda, la modificació dels resultats d'entrada i les característiques de les aigües residuals d'entrada; i per altra banda, una olor molt desagradable (semblant a ous podrits associada a l'àcid sulfhídric). Les recomanacions són les següents: incrementar l'agitació de l'interior del tanc, deixar destapat el tanc (tot i que hi poden haver problemes per exemple els dies de pluja), recobrir-lo amb canyes o un altre material que faci d'aïllant tèrmic,etc.

En segon lloc, el disseny de l'aiguamoll artificial de flux superficial és bastant diferent dels estàndards que marca la bibliografia que van millor per a l'eliminació de contaminants. En principi el gruix de substrat hauria de ser inferior i el temps de retenció també, així funcionaria més com a tractament terciari. Degut a aquest disseny, es produeix una eutrofització a l'AFS. En principi això no és desitjable, però com s'ha vist als resultats, certs paràmetres d'eliminació poden veure's beneficiats. Cal seguir, però, investigant aquestes hipòtesis. Per tant, la recomanació és realitzar el disseny d'aquest aiguamoll seguint els paràmetres que recomana la bibliografia, si l'objectiu últim és depurar aigües residuals i inclús arribar a una lleugera desinfecció. En el cas que es vulgui fer un estudi en profunditat de l'acció de les algues i com intervenen en els processos d'eliminació, caldria realitzar un sistema amb dues possibles sortides, amb les dues configuracions d'AFS.

Finalment, la limitació principal d'aquest projecte ha estat el temps. Tot i que s'han vist resultats que indiquen que el sistema funciona d'acord i com estava planejat, un estudi molt més llarg permetria comprovar molts altres factors interessants. Per exemple es podria confirmar el procés de nitrificació/desnitrificació, canviar el tipus de llit granular per comprovar quin efecte té sobre l'eliminació de nutrients així com provar materials nous per veure el seu efecte, incloure substàncies no presents a l'aigua com contaminants emergents per veure com s'eliminen,etc. Aquesta és la principal recomanació del projecte, ja que un estudi d'aquestes característiques a llarg termini pot arribar a descobrir nous mecanismes que ajudin a desenvolupar aquesta forma d'eliminar els contaminants de l'aigua residual.

9. Programació

	Març			Abril			Maig			Juny			Juliol			Agost			Setembre			
Elecció projecte i primers contactes	■	■	■																			
Recerca de bibliografia				■	■	■	■	■	■													
Col·laboració disseny aiguamoll artificial									■	■	■											
Col·laboració construcció aiguamoll artificial												■	■									
Posada en marxa del sistema													■	■	■	■	■					
Realització d'anàlisis d'aigua residual abans i després del tractament													■	■	■	■	■					
Seguiment evolució de la vegetació plantada													■	■	■	■	■					
Anàlisi i interpretació dels resultats																■	■	■	■			
Reunions de seguiment del projecte			■		■		■	■		■	■	■	■	■	■	■	■					
Redacció de la memòria										■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
Entrega del projecte																				■		
Presentació oral del projecte																					■	

Figura 13. Programació. Font: elaboració pròpia

10.Pressupost

El següent pressupost vol ser una aproximació al cost real de la realització d'aquest projecte.

Recursos humans			
Concepte	Hores	Preu (€)/hora	Total (€)
Recerca bibliografia	50	10	400
Treball laboratori	80	10	800
Manteniment i seguiment evolució sistema híbrid	12	10	120
Redacció memòria	120	10	1200
Col·laboració disseny sistema	10	10	100
Col·laboració construcció sistema	6	10	60
Visita Naturala	3	10	30
Assessorament professionals	30	25	750
Tutories	40	25	1000
			Total = 4460 €

Material*			
Concepte	Unitats	Preu	Total (€)
Reactius	-	-	50
Material de vidre	-	-	200
Vials HACH LANGE	48	-	200
Material de plàstic d'un sol ús	-	-	20
Recipients per agafar mostres	~ 80	-	40
Altres materials laboratori	-	-	20
			Total = 530 €

Equips*			
Concepte	Unitats	Preu	Total (€)
Amortització equips (equip del TOC, equip per mesurar la DBO, equip per mesurar DQO, fosfat..., equip de filtració al buit, etc.)	-	-	200
			Total = 200 €

Desplaçaments			
Concepte	Unitats	Preu (€)/unitat	Total (€)
Desplaçament tren	6	1,7	10,2
Bus	5	0,8	4,0
Cotxe	1140 km	0,15	171
Dietes	7	2,5	17,5
			Total = 202,7 €

Suma cost total	
Recursos humans	4460,0€
Equips	200,0 €
Materials	530,0 €
Desplaçaments	202,7 €
SUBTOTAL	5392,7 €
IVA (18%)	970,7 €
Cost final	6363,4 €

* El preu final dels materials i de l'amortització dels equips s'ha realitzat aproximadament, ja que durant els anàlisis al laboratori s'ha fet servir molt material i és difícil concretar el preu just.

11. Bibliografía

- Barceló D. (2003) "Emerging pollutants in water analysis". *Trends in Analytical Chemistry*, vol. 22, núm. 10, p. XIV-XVI.
- Barrera A. (1999) "Análisis y Caracterización de los Parámetros de las Aguas Residuales Necesarios para el Dimensionamiento de Estaciones Depuradoras de Menos de 2000 hab.-eq". Tesina de Especialidad, ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 110 pp.
- Bragato C. et al., (2009) "Seasonal variations of Cu, Zn, Ni and Cr concentration in *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex steudel in a constructed wetland of North Italy" *Desalination*, vol. 246, 35–44.
- Brix H., (1994) *Journal of Water Science and Technology*, Vol. 30, 209-223.
- Calijuri M. L. et al., (2011) "Evaluation of the Ability of a Natural Wetland to Remove Heavy Metals Generated by Runways and Other Paved Areas from an Airport Complex in Brazil" *Water Air Soil Pollut* ,vol. 219, 319–327.
- Cooper P.F. (2003) "Sizing vertical flow and hybrid constructed wetland systems". En: *The Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in constructed Wetlands*, 1st International Seminar. Dias V. y Vymazal J. (eds.), Instituto Nacional da Água, Lisbon, Portugal, pp. 195-218.
- Cooper P. (2005) "The performance of vertical flow constructed wetland systems with special reference to the significance of oxygen transfer and hydraulic loading rates". *Water Science and Technology*, vol. 51, 91-97.
- Crites R. W., et al., (2006) "*Natural Wastewater Treatment Systems*". Taylor & Francis Group.
- Diaz O.A. et al., (1994) "Solubility of Inorganic P in Stream Water as Influenced by pH and Ca Concentration", *Water Res.*, vol. 28, 1755–1763.
- Dunne J., et al. (2012) "Efficacy of a large-scale constructed wetland to remove phosphorus and suspended solids from Lake Apopka, Florida". *Ecological engineering*, vol. 42, 90-100
- García J., et al., (2004) "Initial contaminant removal performance factors in horizontal flow reed beds used for treating urban wastewater". *Water Research.*, vol. 38, 1669-1678.
- García J. and Corzo A. (2008) "Depuración con Humedales construidos, Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial". Universitat Politècnica de Catalunya.

- Garcia J. et al., **(2010)** Contaminant Removal Processes in Subsurface-Flow Constructed Wetlands: A Review. Critical Reviews, *Environmental Science and Technology*, vol. 40, 561–661.
- Ghermandi et al., **(2007)** “The role of free water surface constructed wetlands as polishing step in municipal wastewater reclamation and reuse” *Science of the Total Environment*, vol. 380, 247-258.
- Greenway M. and Woolley A. **(1999)** “Constructed Wetlands in Queensland: Performance Efficiency and Nutrient” *Bioaccumulation” Ecol. Eng.*, vol. 12, 39–55.
- Kadlec R.H. **(1997)** “An Antibiotic Wetland Phosphorus Model”, *Ecol. Eng.*, vol. 8, 145–172.
- Kropfelova L., et al. **(2009)** “Removals of trace elements in three horizontal sub-surface flow constructed wetlands in the Czech-Republic” *Environmental Pollution*, vol.157, 1186-1194.
- Matamoros V and Bayona J.M **(2006)** “Elimination of pharmaceuticals and personal care products in surface flow constructed wetland”. *Environment Science and Technology*, vol. 40, 5811-5816.
- Matamoros V. et al., **(2010)** “ Eliminación de microcontaminantes orgánicos presentes en efluentes domésticos mediante humedales construidos”. *Tecnología del agua*, vol. 322, 22-26.
- Matamoros V., Salvadó V., **(2012)** “Evaluation of the seasonal performance of a water reclamation pond-constructed wetland system for removing emerging contaminants” *Chemosphere*, vol. 86, 111-117.
- Mays P., Edwards G., **(2001)** “Comparison of heavy metal accumulation in a natural wetland and constructed wetlands receiving acid mine drainage” *Ecological Engineering*, vol. 16, 487-500.
- Nihla A. **(2011)** “Removal of Heavy Metals from Landfill Leachate Using Horizontal and Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland Planted with *Limnocharis flava*”, *International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS* , vol. 11, 85-91.
- O’Neill A., et al. **(2011)** “Phosphorus retention in a constructed wetland system used to treat dairy wastewater”. *Bioresource Technology*, vol. 102, 5024-5031.
- Plaza de los Reyes C. et al., **(2001)** “ Consideraciones para la eliminación del nitrógeno en humedales artificiales”, *Tecnología del agua*, vol. 330, 40-49
- Reddy K.R. et al., **(1999)** “Phosphorus Retention in Streams and Wetlands: A Review” *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, vol. 29, 83–146.
- Tanner C., **(1996)** “Plants for constructed wetland treatment systems – A comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species” *Ecological Engineering*, vol.7, 59-83.

Tanner C.C. et al., **(1998)** “Relationships Between Loading Rates and Pollutant Removal during Maturation of Gravel-Bed Constructed Wetlands”, *Environ. Qual.*, vol. 27 (2), 448–458.

Tang X.Q. et al., **(2009)** “Comparison of phosphorus removal between vertical subsurface flow constructed wetlands with different substrates”, *Water and Environment Journal*, vol 23, 180–188.

Uggetti E., et al., **(2012)** “Quantification of greenhouse gas emissions from sludge treatment wetlands” *Water research*, vol. 46, 1755-1762.

Uggetti E., et al., **(2011)** “Technical, economic and environmental assessment of sludge treatment wetlands” *Water research*, vol. 45, 573-582.

Vera I., et al., **(2011)** “Performance evaluation of eight years experience of constructed wetland systems in Catalonia as alternative treatment for small communities” *Ecological Engineering*, vol. 37, 364-371.

Vymazal J. **(2008)** “Constructed wetlands for wastewater treatment: a review”. The 12th World Lake Conference, 965-980.

Altres documents consultats

Decret 130/2003. Concentracions màximes contaminants en aigua no domèstica que entra en una EDAR

Directiva 91/271/CEE. Qualitat abocaments procedents d'instal·lacions de depuració d'aigües residuals urbanes al medi natural mitjançant tractament secundari.

EPA. *Folletos Informativos de Tecnología de Aguas Residuales de la EPA. Humedales de flujo libre superficial. parte 1.* EPA 832-F-00-024 **(2000)** y *Humedales de flujo libre subsuperficial. parte 1.* EPA 832-F-00-023 **(2000)**.

Manual de depuración de aguas residuales urbanas. Alianza por el Agua.

Metcalf & Eddy, Incorporated. **(2003)** “Wastewater engineering. Treatment and reuse” 4^a ed. International Edition. Boston [etc]: Mc Graw Hill, 2003, 1819p. ISBN: 0-07-112250-8.

Norma UNE-EN-1484

Norma UNE-EN-25663

PSARU 2005. Annex 5, Objectius de qualitat. Agència Catalana de l'aigua.

Standard Methods 5210 B

Standard Methods 2540 D

Annexos

Annex I

Límits marcats pel Decret 130/2003, on s'indiquen les concentracions màximes d'alguns contaminants en una aigua no domèstica quan entra en una depuradora pública.

Taula 45. Concentracions màximes contaminants aigües no domèstiques a l'entrada de depuradora. Font: Decret 130/2003

Paràmetre	Valor	Unitats
Temperatura	40	°C
pH	6 - 10	-
MES (Matèries en suspensió)	750	mg/L
DBO ₅	750	mg/L O ₂
DQO	1500	mg/L O ₂
Olis i greixos	250	mg/L
Clorurs	2500	mg/L Cl ⁻
Conductivitat	6000	mS/cm
Diòxid de sofre	15	mg/L SO ₂
Sulfats	1000	mg/L SO ₄
Sulfurs totals	1	mg/L S ₂₋
Sulfurs dissolts	0,3	mg/L S ₂₋
Fòsfor total	50	mg/L P
Nitrats	100	mg/L NO ₃
Amoni	60	mg/L NH ₄
Nitrogen orgànic i amoniacal	90	mg/L N

Annex II

Normativa europea que marca la qualitat de l'aigua a abocar a llera pública. Es tracta de la directiva 91/271/CEE sobre els requisits d'abocament procedents d'instal·lacions de depuració d'aigües residuals urbanes mitjançant tractament secundari.

Cuadro 1: Requisitos por los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas sujetos a lo dispuesto en los artículos 4 y 5 de la presente Directiva. Se aplicará el valor de concentración o el porcentaje de reducción.

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción ⁽¹⁾	Método de medida de referencia
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO 5 a 20 °C) sin nitrificación ⁽²⁾	25 mg/l O ₂	70-90 40 de conformidad con el apartado 2 del artículo 4	Muestra homogeneizada, sin filtrar ni decantar. Determinación del oxígeno disuelto antes y después de 5 días de incubación a 20 °C ± 1 °C, en completa oscuridad. Aplicación de un inhibidor de la nitrificación
Demanda química de oxígeno (DQO)	125 mg/l O ₂	75	Muestra homogeneizada, sin filtrar ni decantar. Dicromato potásico
Total de sólidos en suspensión	35 mg/l ⁽³⁾ 35 de conformidad con el apartado 2 del artículo 4 (más de 10 000 e-h) 60 de conformidad con el apartado 2 del artículo 4 (de 2 000 a 10 000 e-h)	90 ⁽³⁾ 90 de conformidad con el apartado 2 del artículo 4 (más de 10 000 e-h) 70 de conformidad con el apartado 2 del artículo 4 (de 2 000 a 10 000 e-h)	— Filtración de una muestra representativa a través de una membrana de filtración de 0,45 micras. Secado a 105 °C y pesaje — Centrifugación de una muestra representativa (durante 5 minutos como mínimo, con una aceleración media de 2 800 a 3 200 g), secado a 105 °C y pesaje.

⁽¹⁾ Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada.

⁽²⁾ Este parámetro puede sustituirse por otro: carbono orgánico total (COT) o demanda total de oxígeno (DTO), si puede establecerse una correlación entre DBO 5 y el parámetro sustitutivo.

⁽³⁾ Este requisito es optativo.

Los análisis de vertidos procedentes de fosos de fermentación se llevarán a cabo sobre muestras filtradas; no obstante, la concentración de sólidos totales en suspensión en las muestras de aguas sin filtrar no deberán superar los 150 mg/l.

Figura 14. Requisites fisicoquímics d'aigua d'abocament provinent d'EDAR. Font: Directiva 91/271/CEE

Cuadro 2: Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas realizados en zonas sensibles propensas a eutrofización tal como se identifican en el punto A a) del Anexo II. Según la situación local, se podrá aplicar uno a los dos parámetros. Se aplicarán el valor de concentración o el porcentaje de reducción.

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción (%)	Método de medida de referencia
Fósforo total	2 mg/l P (de 10 000 a 100 000 e-h) 1 mg/l P (más de 100 000 e-h)	80	Espectrofotometría de absorción molecular
Nitrógeno total ⁽²⁾	15 mg/l N (de 10 000 a 100 000 e-h) 10 mg/l N (más de 100 000 e-h) ⁽³⁾	70-80	Espectrofotometría de absorción molecular

(1) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada.

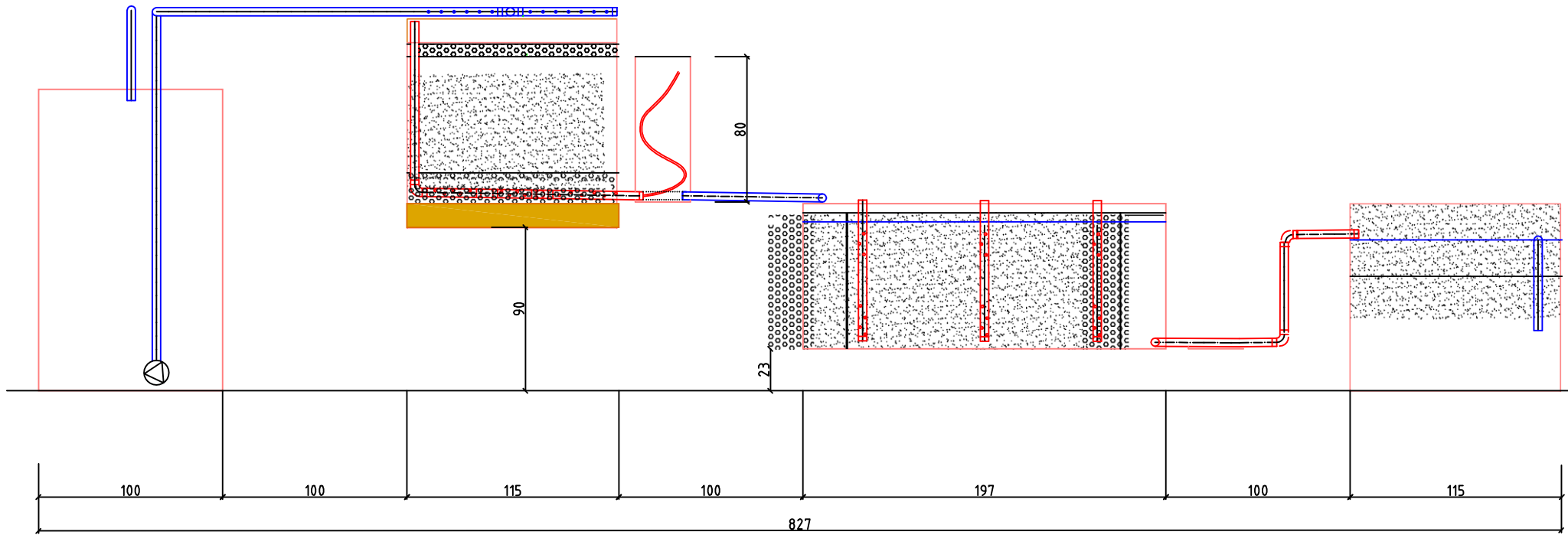
(2) Nitrógeno total equivale a la suma de nitrógeno Kjeldahl total (N orgánico + NH₃), nitrógeno en forma de nitrato (NO₃) y nitrógeno en forma de nitrito (NO₂).

(3) Alternativamente el promedio diario no deberá superar los 20 mg/l N. Este requisito se refiere a una temperatura del agua de 12° C o más durante el funcionamiento del reactor biológico de la instalación de tratamiento de aguas residuales. En sustitución del requisito relativo a la temperatura, se podrá aplicar una limitación del tiempo de funcionamiento que tenga en cuenta las condiciones climáticas regionales. Se aplicará esta alternativa en caso de que pueda demostrarse que se cumple el apartado 1 de la letra D del presente Anexo.

Figura 15. Requisites microbiològics d'aigua d'abocament provinent d'EDAR. Font: Directiva 91/271/CEE

Annex III

Plànols del disseny del sistema híbrid d'aiguamolls artificials realitzats pel Hidroquímia de perfil de tot el sistema, en planta de tot el sistema i de l'AFSSV respectivament.



MEDIDAS EN CM. diámetro de todos los tubos: 32 mm

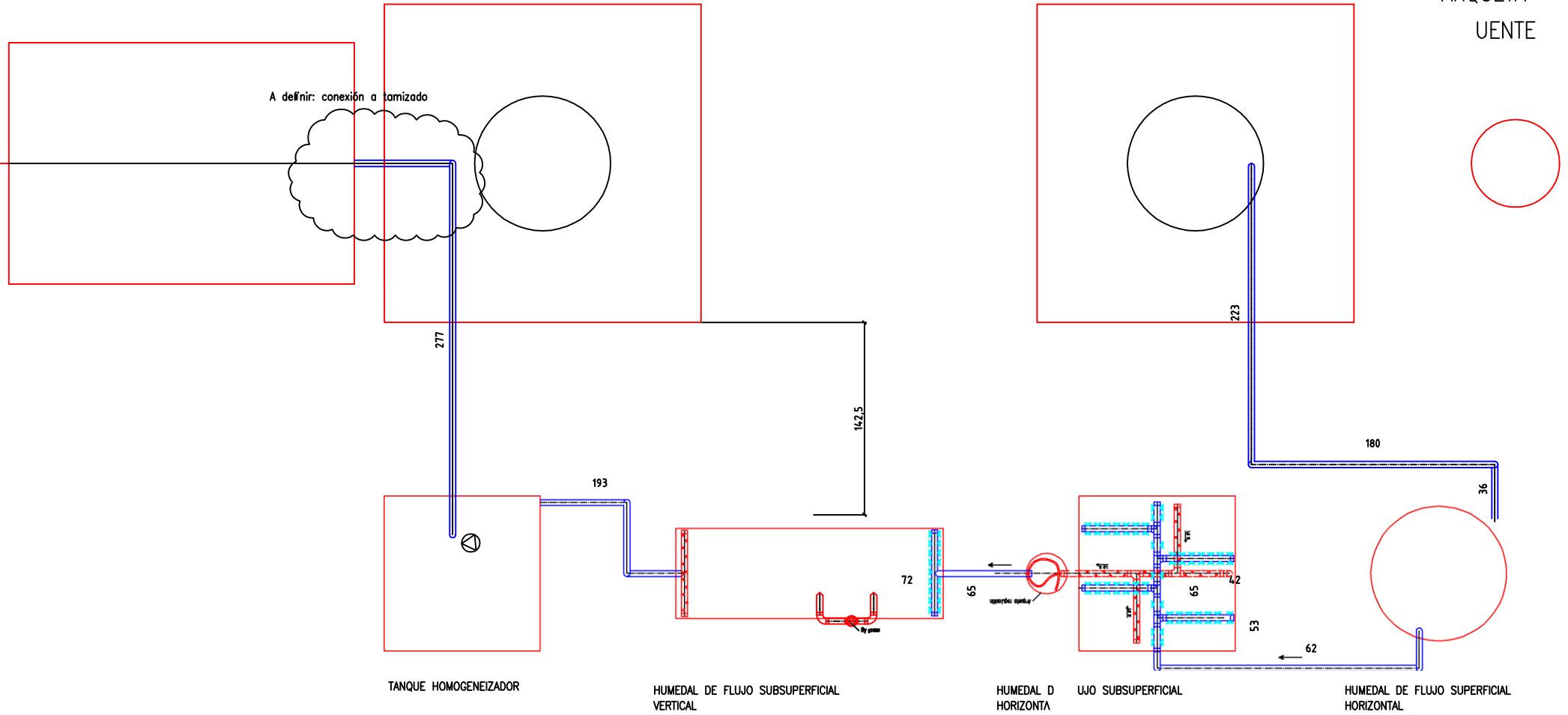
TAMIZADO FINOS

ARQUETA 1 BIOLÓGICO

ARQUETA 2 BIOLÓGICO

ARQUETA UENTE

A definir: conexión a tamizado



TANQUE HOMOGENEIZADOR

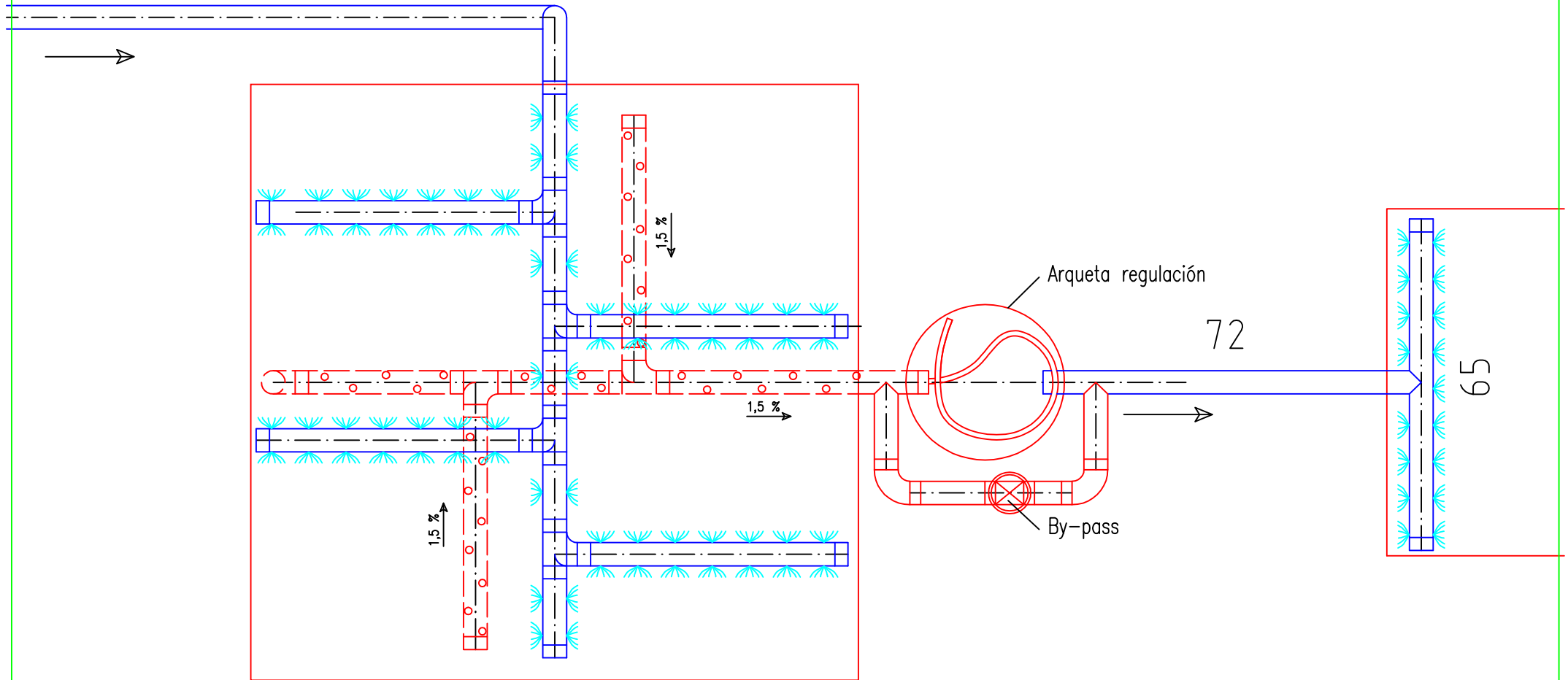
HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL

HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL

HUMEDAL DE FLUJO SUPERFICIAL HORIZONTAL

MEDIDAS EN CM. diámetro de todos los tubos: 32 mm

193



HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL

MEDIDAS EN CM. diámetro de todos los tubos: 32 mm

Annex V

Fotografies ordenades cronològicament de l'evolució de la vegetació als aiguamolls.



Figura 16. Fotografies sistema híbrid, setmana 1. Font: elaboració pròpia.



Figura 17. Fotografies sistema híbrid, setmana 2. Font: elaboració pròpia.



Figura 18. Fotografies sistema híbrid, setmana 3. Font: elaboració pròpia.



Figura 19. Fotografies sistema híbrid, setmana 4. Font: elaboració pròpia.

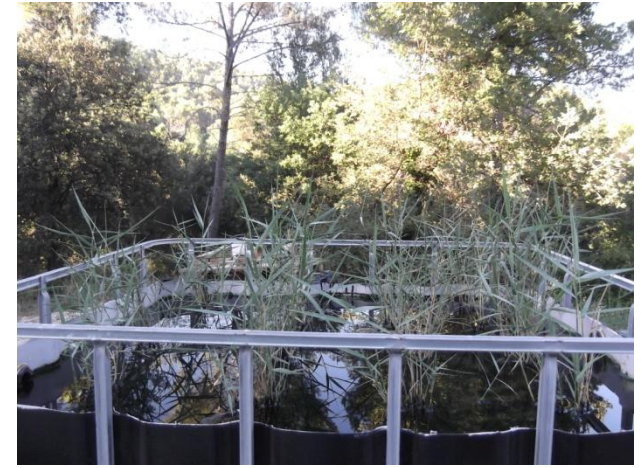


Figura 20 Fotografies sistema híbrid, setmana 5. Font: elaboració pròpia.



Figura 21 Fotografies sistema híbrid, setmana 6. Font: elaboració pròpia.

