

## CAPÍTOL 3: REVISIÓ BIBLIOGRÀFICA

### 3.1 Aiguamolls naturals i aiguamolls construïts

Els aiguamolls es defineixen com a terrenys on la superfície d'aigua està a prop de la superfície del terreny durant un temps suficientment llarg a l'any per tal de mantenir unes condicions de sòl saturat, a més de la vegetació pròpia d'aquests ecosistemes. La majoria d'aiguamolls naturals són sistemes on l'aigua està en contacte directe amb l'atmosfera; podem trobar terrenys pantanosos (vegetació principal: molses), pantans (vegetació principal: arbres), i maresmes (vegetació principal: herbes i macròfits emergents). En la naturalesa hi ha molts exemples d'aiguamolls, com ara el Delta de l'Ebre o els aiguamolls de l'Empordà.

La millora en la qualitat de les aigües en aiguamolls naturals ja s'havia observat durant anys pels científics i enginyers, i això va portar al desenvolupament d'aiguamolls construïts per intentar reproduir la qualitat de l'aigua i els beneficis d'aquest hàbitat en un ecosistema construït. Les reaccions que contribueixen en la millora de la qualitat de l'aigua en aquest sistemes són físiques, químiques i bioquímiques. Les reaccions biològiques són degudes a l'activitat dels microorganismes adherits a la superfície del substrat submergit.

Un aiguamoll construït és aquell aiguamoll que s'ha dissenyat i construït específicament amb el propòsit de depurar les aigües residuals que hi arriben, ja siguin urbanes o agrícoles. Es tracta d'un sistema natural de depuració ja que funciona amb energia natural ambiental i, per tant, no requereixen energia externa. Això fa que requereixin d'una major superfície per a obtenir el mateix grau de depuració que els sistemes convencionals. En canvi, el seu cost d'exploració i manteniment és molt inferior als que empen tecnologies convencionals.

Els aiguamolls construïts són sistemes de tractament d'aigües residuals formats per una o més cel·les de tractament en un ambient construït i parcialment controlat per dur a terme la depuració de les aigües que hi arriben. Tot i que els aiguamolls construïts han estat utilitzats per tractar diversos tipus d'aigua residual i en varis nivells de depuració, els aiguamolls construïts més comuns són aquells que proporcionen un tractament secundari a les aigües residuals. Per tant, els aiguamolls reben aigua efluent d'un tractament primari i la tracten fins assolir els estàndards d'efluent secundari. Finalment, si escau, es pot recórrer a un tractament terciari mitjançant una llacuna de refinament o altres sistemes de desinfecció.

Durant els darrers 20 anys, els aiguamolls construïts s'havien emprat bàsicament per a un tractament terciari. Actualment, emperò, s'utilitzen per a tractar aigües amb càrregues contaminant superiors, gràcies als estudis científics i múltiples experiències que permet el disseny òptim d'aiguamolls per al tractament secundari. Tot i així, els aiguamolls construïts per al tractament secundari poden combinar-se amb altres tecnologies de tractament secundari, com per exemple: col·locar un aiguamoll construït aigües amunt en la cadena de tractament seguit d'un sistema d'infiltració per tal

d'optimitzar el cost del tractament secundari. Per tant, els aiguamolls construïts permeten obtenir nivells de tractament secundari o terciari. Tot i així cal remarcar que no són gens recomanables per a tractar aigua residual bruta.

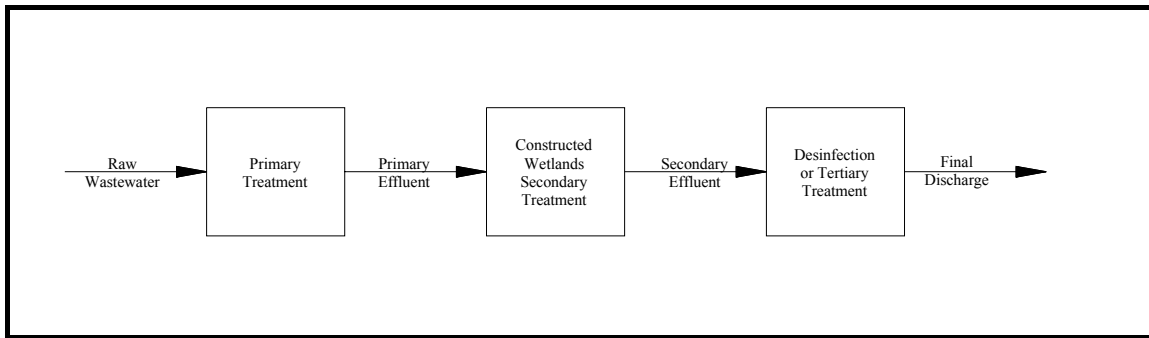


Figura 3.1 Possible tractament d'aigua residual quan s'utilitzen aiguamolls construïts. (U.S. EPA, 2001).

Els aiguamolls construïts són una tecnologia efectiva i fiable per depurar l'aigua si estan dissenyats, construïts, explotats i mantinguts correctament. Poden eliminar la majoria del contaminant associat a l'aigua residual municipal i industrial, així com a l'aigua de les primeres hores de pluja. Normalment es dissenyen per reduir la DBO (Demanda Bioquímica d'Oxigen) i els sòlids en suspensió. Tot i així, també s'han construït aiguamolls per tal d'eliminar metalls (cadmi, crom, ferro, plom, zinc, etc.) i compostos orgànics tòxics de les aigües residuals.

### 3.2 Tipus de sistemes d'aiguamolls construïts

Els aiguamolls construïts comprenen dos tipus de sistemes de tractament que comparteixen moltes de les característiques, però que es distingeixen per la localització de la línia del gradient hidràulic. Aquests dos tipus bàsics d'aiguamolls construïts són: els aiguamolls de flux superficial i els aiguamolls de flux subsuperficial.

Els aiguamolls construïts de flux superficial (FWS – Free Water Surface) s'assemblen molt als aiguamolls naturals tant en aparença com en la seva funció. La vegetació que podem trobar és combinació de les plantes aquàtiques emergents (canyís, boga, etc.), plantes flotants i plantes aquàtiques submergides. Els aiguamolls de flux superficial difereixen en la superfície exposada a l'atmosfera, en funció amb la vegetació que hi predomina. Consisteixen típicament en una llera o canals amb algun tipus de capa impermeable per evitar infiltracions, sòl per sustentar les arrels de la vegetació emergent i aigua de poca profunditat que flueix pel sistema.

En aquests aiguamolls la direcció de flux és horitzontal. Es tracta d'uns sistemes que presenten una ecologia aquàtica complexa, ja que a més a més de l'ecosistema vegetal existent, representen un hàbitat per a aus aquàtiques i pròpies del aiguamolls.

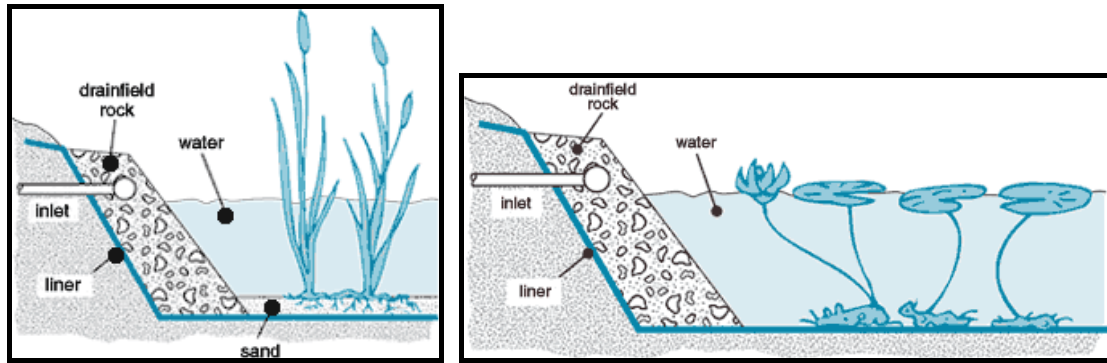


Figura 3.2 Aiguamolls de flux superficial plantats amb diferents tipus de macròfits (U.S. EPA, 2001).

Els aiguamolls de flux subsuperficial (SF- Surface Flow) també consisteixen en una llera excavada en el terreny amb una barrera per prevenir la infiltració, però aquesta llera té una profunditat convenient i està omplerta amb un medi porós. Graves o roques són els medis més comunament usats als Estats Units i a Europa. Les plantes emergent d'aquests aiguamolls estan arrelades a la grava però, en aquest cas, l'aigua flueix a través de la grava per sota de la superfície. El disseny d'aquests sistemes pressuposa que el nivell de l'aigua en la llera romandrà sempre per sota de la superfície del medi de grava o roca. Aquest sistema també és poc profund i conté suficient grava de gran diàmetre per permetre el flux subsuperficial a llarg termini sense curullació. Les arrels i els rizomes de les plantes creixen gràcies als espais de la porositat de la grava. La immensa majoria dels aiguamolls de flux subsuperficial han utilitzat flux horitzontal continu i en medi saturat, però existeixen sistemes a Europa que han emprat flux vertical.

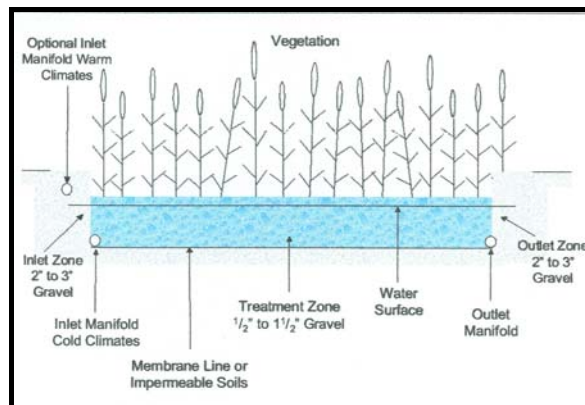


Figura 3.3 Diagrama esquemàtic d'un aiguamoll construït de flux subsuperficial (U.S. EPA, 2000).

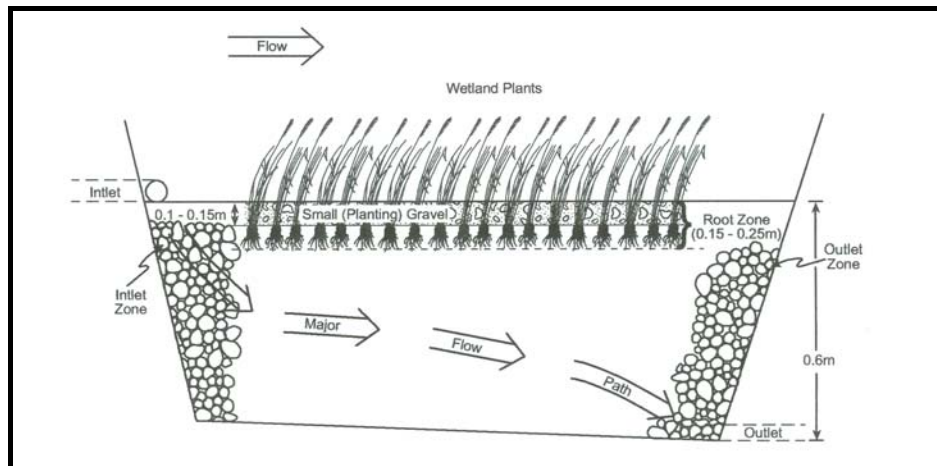


Figura 3.4 Esquema del flux en un aiguamoll de flux subsuperficial (U.S. EPA, 2001).

### 3.2.1 Aiguamolls de flux subsuperficial vs. Aiguamolls de flux superficial

Els aiguamolls de flux subsuperficial presenten diversos avantatges respecte als de flux superficial:

- Si la superfície de l'aigua es manté per sota de la superfície del medi, el risc de males olors, exposició directa a persones, o aparició d'insectes és molt baix.
- Les reaccions biològiques que permeten l'eliminació de matèria orgànica són dutes a terme per l'activitat dels microorganismes adherits a les superfícies del substrat submergit. En el cas dels aiguamolls de flux superficial aquests substrats són la porció submergida de les plantes vives, les plantes mortes que penetren a l'aigua i la capa de sòl bentonític. En els aiguamolls de flux subsuperficial el substrat submergit disponible inclou les arrels de les plantes que creixen en el medi porós i la superfície del mateix medi, generalment grava. Per tant, el medi granular proporciona una superfície disponible per al tractament superior a la dels aiguamolls de flux superficial. En conseqüència, la resposta de tractament pot donar-se més ràpidament en el tipus de flux subsuperficial, els quals podran construir-se amb una menor àrea que els sistemes de flux superficial dissenyats per a un mateix cabal i objectius a acomplir en l'efluent.
- La posició subsuperficial de l'aigua i l'acumulació de restes vegetals en la superfície de la llera de l'aiguamoll de flux subsuperficial ofereixen una major protecció tèrmica en climes freds que els de tipus superficial, on l'aigua està en contacte directe amb l'atmosfera.

- Els aiguamolls de flux subsuperficial no proporcionen el mateix valor com a hàbitat que els de flux superficial perquè l'aigua del sistema no està exposada ni és accessible a ocells i animals. No obstant, la fauna hi és present, principalment en forma de nidificació d'animals, ocells i rèptils. Si un dels objectius del projecte consisteix en crear un hàbitat de gran valor, es poden col·locar llacunes més profundes entre els aiguamolls de flux subsuperficials allà on l'aigua ja tingui una qualitat propera a un tractament secundari.

### 3.2.2 *Avantatges i inconvenients dels aiguamolls de flux subsuperficial*

Alguns dels avantatges i inconvenients dels aiguamolls de flux subsuperficial són els que s'anuncien a continuació:

#### **Avantatges:**

- Proporcionen un tractament efectiu d'una manera passiva i minimitzen l'equipament mecànic i l'atenció de personal especialitzat.
- Poden ser cars a l'hora de construir-los, però en canvi resulten menys costosos en quant a l'explotació i manteniment comparat amb els processos de tractament convencionals dissenyats per a produir un efluent d'igual qualitat.
- L'explotació per a obtenir un tractament secundari pot dur-se a terme durant tot l'any de forma correcta, fins i tot en climes freds.
- L'explotació per tractaments avançats o terciaris és possible al llarg de tot un any en climes càlids o moderadament temperats. La configuració dels aiguamolls de flux subsuperficial proporciona més protecció tèrmica que els aiguamolls de flux superficial.
- Els aiguamolls de flux subsuperficial no produeixen residus sòlids biològics o fangs que requereixin el subseqüent tractament i disposició.
- Els aiguamolls de flux subsuperficial són molt efectius i fiables per l'eliminació de la DBO, DQO, MES, metalls i alguns compostos orgànics resistents. La reducció de nitrogen i fòsfor també és possible però requereix un temps de retenció molt superior.
- L'aparició de mosquits o d'altres insectes similars no és un problema amb els aiguamolls de flux subsuperficial, sempre i quant el sistema s'exploti correctament i el nivell d'aigua es mantingui per sota de la superfície del medi. El risc de contacte de nens o animals amb l'aigua parcialment tractada queda també eliminat.

**Inconvenients:**

- Requereixen una gran extensió de terreny en comparació amb els processos de tractament convencionals.
- L'eliminació de la DBO, DQO i nitrogen en els aiguamolls de flux subsuperficial són processos constantment renovables. El fòsfor, metalls i els compostos orgànics persistents eliminats en el sistema són confinats en els sediments de l'aiguamoll i acumulats al llarg del temps.
- En climes freds la baixa temperatura de l'aigua durant l'hivern redueix la velocitat d'eliminació de la DBO, NH<sub>3</sub> i nitrats. Un augment del temps de retenció pot compensar aquesta reducció de les velocitats d'eliminació, però l'augment de la mida de l'aiguamoll en climes extremadament freds pot no ser econòmicament o tècnicament viable.
- La major part de l'aigua continguda en l'aiguamoll de flux subsuperficial és anòxica i això limita el potencial per la nitrificació de l'amoníac de l'aigua residual. Augmentant la mida de l'aiguamoll i el temps de retenció es podria compensar aquest problema, però pot resultar no ser econòmicament efectiu. Hi ha mètodes de nitrificació alternatius que combinats amb l'aiguamoll de flux subsuperficial han donat bons resultats. Els aiguamolls de flux subsuperficial no poden ser dissenyats per la completa eliminació dels compostos orgànics, la matèria en suspensió, el nitrogen i els coliformes. Els cicles ecològics naturals en aquests aiguamolls produeixen una concentració residual d'aquestes substàncies en l'efluent.
- Els aiguamolls de flux subsuperficial poden reduir la concentració de coliformes fecals en una unitat logarítmica com a mínim. Això sempre és suficient per assolir els límits de descàrrega en tots els àmbits i pot ser necessari la posterior desinfecció de l'aigua. La desinfecció mitjançant raigs ultraviolats ha estat emprada amb èxit en nombroses plantes.
- Tot i que els aiguamolls de flux subsuperficial poden tenir unes dimensions menors que els de flux superficial per a l'eliminació de la majoria de contaminant, l'elevat cost de la grava com a medi porós en aiguamolls de flux subsuperficial pot donar lloc a uns costos de construcció que facin més adient optar per l'opció de flux superficial (U.S. EPA 2001).

### **3.3 Components dels aiguamolls de flux subsuperficial**

Un sistema convencional de flux subsuperficial és el que es pot observar en la Figura 3.5. Els components típics inclouen: (1) estructures d'entrada de l'afluent; (2) una membrana sintètica o argila al fons de la llera per impermeabilitzar-la; (3) reompliment de la llera amb un medi porós, per exemple, grava; (4) vegetació típica d'aiguamolls plantada al medi; i (5) estructures de sortida flexibles per tal de permetre el control del nivell de l'aigua en l'aiguamoll.

En la Figura 3.5 es pot observar l'aparença esquemàtica d'un aiguamoll construït de flux subsuperficial.

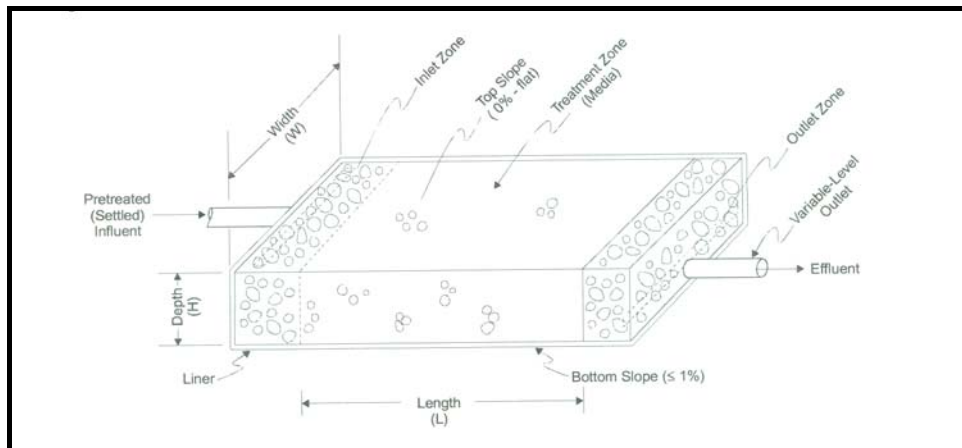


Figura 3.5 Diagrama esquemàtic d'un aiguamoll de flux subsuperficial (U.S. EPA, 2001).

### 3.3.1 Impermeabilització

Els aiguamolls de flux subsuperficial es componen per una o més lleres de poca profunditat amb algun tipus de barrera per prevenir les infiltracions que puguin afectar les aigües subterrànies. El tipus de barrera dependrà de les condicions locals. En alguns casos és suficient amb una adequada compactació dels terrenys, en altres casos es pot portar argila, o bé utilitzar membranes de plàstic (PVC o polietilè d'alta densitat, HDPE) per impermeabilitzar la llera.

### 3.3.2 Estructures d'entrada i sortida

Cal emprar estructures d'entrada i sortida apropiades per assegurar la distribució i la recollida uniforme de l'aigua residual que s'aplica a l'aiguamoll. Per a l'entrada, normalment es fa servir un tub perforat en diversos punts que està col·locat en la part superior de l'aiguamoll en una zona de grava gruixuda. Això permet que l'aigua s'escoli ràpidament cap a l'aiguamoll i de forma uniforme. En quant a la sortida, és recomanable emprar un tub flexible que permeti regular el nivell de l'aigua en l'aiguamoll.

### 3.3.3 Medi granular

La profunditat del medi en els aiguamolls de flux subsuperficial varia entre 0,3 i 0,9 metres, essent 0,6 metres el més comú. El diàmetre del medi emprat pot oscil·lar entre 0,6 cm (grava fina) fins a 16 cm (roca trencada). Sovint es col·loca una combinació de mides entre 1,5 cm i 4 cm. El medi que s'utilitza ha d'estar net, ha de ser dur, durable i capaç de mantenir la seva forma i la permeabilitat en l'aiguamoll a llarg termini.

### 3.3.4 Vegetació

La vegetació emergent que més utilitza en aiguamolls de flux subsuperficial és el canyís (*Phragmites australis*), la boga (*Typha latifolia*) o el jonc (*Scirpus lacustris*). A Europa es prefereix les Phragmites, ja que es tracta d'una planta que creix ràpidament, forta i no és font d'aliment per animals o ocells. En canvi, en alguns llocs d'Estats Units no està permès l'ús de Phragmites perquè és una planta agressiva i hi ha una preocupació per si pot estendre's pels aiguamolls naturals a mode de plaga.

La vegetació en els aiguamolls de flux subsuperficial no és el factor principal a l'hora d'eliminar nutrients del sistema i no requereixen ser recollits periòdicament. En climes freds, l'acumulació de restes de plantes a la superfície de la llera proporciona una protecció tèrmica molt útil en els mesos d'hivern. Les arrels submergides de les plantes proporcionen un substrat per als processos microbians. Gràcies a la transferència d'oxigen de les plantes des de les fulles a les seves arrels, es creen microambients aeròbics als rizomes de la superfície de les arrels. Però la major part de l'ambient submergit en els aiguamolls de flux subsuperficial està mancat d'oxigen. Aquesta manca d'oxigen disponible limita l'eliminació biològica de l'amoniac mitjançant la nitrificació, però el sistema continua essent efectiu per a l'eliminació de la DBO, MES, metalls i d'altres contaminants, ja que aquesta pot tenir lloc tant en condicions aeròbiques com anaeròbiques. L'eliminació de nitrats a través de la desnitrificació és molt efectiva, ja que les condicions anaeròbiques necessàries estan sempre presents i les fonts de carboni en general són abundants.

### 3.4 Aiguamolls de flux subsuperficial: Consideracions generals per al seu disseny

Des de finals dels anys 80's es poden trobar publicats models per al disseny d'aiguamolls de flux subsuperficial. A mitjanç dels anys 90's es van editar tres llibres on apareixen models per al disseny d'aiguamolls de flux subxuperficial (Reed et al., 1995, Kadlec i Knight, 1996, Tchobanoglous i Burton, 1995). En els tres casos, els models es basen en un model de flux en pistó amb cinètica de primer ordre. En l'informe de la US EPA de l'any 2000 es poden trobar aquests models. Per dissenyar un aiguamoll de flux subsuperficial caldria consultar aquestes referències i seleccionar el mètode que millor s'ajusta al projecte que es desitja realitzar.

Les dimensions de l'aiguamoll vénen determinades pel contaminant que requereix la superfície de terreny més gran per a la seva eliminació. Aquesta àrea és la corresponent a la superfície inferior de l'aiguamoll, perquè aquesta àrea sigui cent per cent efectiva i l'aigua residual ha de distribuir-se uniformement per tota la superfície. Aixó és possible donant un cert pendent a la base de l'aiguamoll i amb unes correctes estructures d'entrada i de sortida de l'aigua al sistema. L'àrea total necessària per al tractament hauria de dividir-se en, com a mínim, dues cel·les, fins i tot per als sistemes de poca envergadura. Els sistemes més grans, haurien de tenir, al menys, dos sèries de cel·les en paral·lel per proporcionar flexibilitat durant la seva gestió i explotació.

Aquests aiguamolls són ecosistemes vius i els cicles de vida i mort de la biota produeix residus tant de DBO, de MES, com de nitrogen, fòsfor i coliformes fecals. Com a resultat, independentment de la mida de l'aiguamoll o les característiques de l'afluent,



en aquests sistemes sempre hi haurà una concentració residual d'aquests materials. En la Taula 3.1 es sintetitzen aquestes concentracions residuals.

Taula 3.1 Concentracions residuals en aiguamolls de flux subsuperficial (U.S. EPA, 1993)

Constituent	Unitats	Rang de concentració
DBO <sub>5</sub>	mg/l	1 - 10
MES	mg/l	1 - 6
N	mg/l	1 - 3
NH <sub>3</sub> /NH <sub>4</sub> com a N	mg/l	< 0.1
NO <sub>3</sub> com a N	mg/l	< 0.1
P	mg/l	<0.2
Coliformes fecals	NMP/100 ml	50 - 500

### 3.4.1 *Temperatura*

Un altre aspecte important a l'hora de dissenyar un aiguamoll de flux superficial és la temperatura de l'aigua, ja que l'eliminació de la DBO i les diferents formes de nitrogen són dependents de la temperatura. En els sistemes en què el temps de retenció sigui llarg (superior a 10 dies) la temperatura de l'aigua s'aproximarà a la de l'aire, excepte durant els períodes de gelada durant l'hivern. Els mètodes per estimar la temperatura de l'aigua per aiguamolls amb temps de retenció inferior a 10 dies pot trobar-se a les referències publicades esmentades anteriorment.

### 3.4.2 *Hidràulica*

També és necessari considerar aspectes hidràulics en el disseny del sistema, ja que hi ha una resistència friccional al flux al llarg de l'aiguamoll important causada per la presència de la grava, les arrels de les plantes i d'altres detritus. La configuració que es seleccioni per a l'aiguamoll serà un dels paràmetres que més impacte tindrà en la resistència al flux. Com més llarg sigui el recorregut de l'aigua, major serà la resistència. Per evitar aquests problemes hidràulics es recomana dissenyar els aiguamolls amb un ratio d'aspecte (L:W) de 4:1 o inferior.

La Llei de Darcy és la que es pren generalment coma model de flux de l'aigua al llarg dels aiguamolls de flux subsuperficial. El flux al llarg de la llera depèn del gradient hidràulic en aquesta i de la conductivitat hidràulica (Ks), que alhora ve definida per la mida i la porositat del medi que s'empra per omplir la llera.

En la Taula 3.2 es presenten les característiques típiques dels materials de replà en aiguamolls de flux subsuperficial.

Taula 3.2 Característiques del medi típiques per aiguamolls de flux subsuperficial (U.S. EPA, 1993)

Tipus de medi	Diàmetre efectiu $D_{10}$ (mm)	Porositat n (%)	Conductivitat hidràulica $K_s$ ( $m^3/m^2/d$ )
Sorra grollera	2	28 - 32	10 - 1000
Sorra gravosa	8	30 - 35	500 - 5000
Grava fina	16	35 - 38	1000 - 10000
Grava mitjana	32	36 - 40	10000 - 50000
Roques petites	128	38 - 45	50000 - 250000

### 3.5 Procés de depuració dels aiguamoll de flux subsuperficial

En aquest apartat no es descriuen explícitament quins mecanismes físics, químics i biològics tenen lloc per a la reducció o eliminació dels diferents contaminants, sinó que es fa un resum dels processos i quins principis els regeixen. Per trobar les fórmules que determinen la reducció de la DBO, la MES, el nitrogen, el fòsfor i d'altres elements, ens remetem les referències bibliogràfiques.

#### 3.5.1 MES

La matèria en suspensió queda retinguda en l'aiguamoll mitjançant la filtració en el medi granular. Els mecanismes físics que tenen lloc són: l'adsorció, el xoc amb altres partícules, la coagulació i els mecanismes propis de la filtració. Les arrels també col·laboren en aquesta retenció física de les partícules sòlides. S'ha pogut comprovar que l'eliminació de la MES es produeix bàsicament en els primers metres de l'aiguamoll.

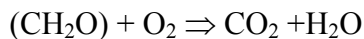
La càrrega superficial de matèria en suspensió que arriba a l'aiguamoll no hauria de ser superior a 20 g MES/m<sup>2</sup>/d per evitar l'acumulament i assegurar la vida del sistema (Garcia et al., 2001).

### 3.5.2 DBO

Els mecanismes d'eliminació de la matèria orgànica són encara avui poc coneguts, i el concepte de "caixa negra" per dissenyar els aiguamolls és el més utilitzat. Els mecanismes de degradació de la matèria orgànica dissolta es produeixen gràcies a la biopel·lícula adherida al substrat, mitjançant processos aeròbics i anaeròbics simultàniament. La predominança d'una d'aquestes reaccions bioquímiques respecte l'altra depèn de factors ambientals com la composició de l'aigua residual, la profunditat de la llera i la temperatura.

En general, els sistemes naturals, com els aiguamolls construïts, s'haurien de dissenyar de manera que resulti possible mantenir condicions aeròbiques, es a dir, que la degradació de la matèria orgànica es realitzi mitjançant els microorganismes aeròbics, ja que la descomposició aeròbica acostuma a ser més ràpida i completa que l'anaeròbia i, per tant, s'eviten els problemes d'olors associats als processos de descomposició anaeròbia.

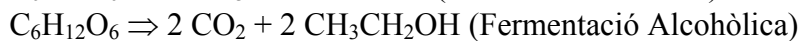
La degradació aeròbica de la matèria orgànica gràcies a la presència de bacteris aeròbics heteròtrofs es regeix per l'equació fonamental següent:



Si la presència d'oxigen en l'aigua és molt baixa o nul·la, els bacteris que duen a terme aquesta reacció no poden desenvolupar-se tant, i passa a predominar la degradació anaeròbia de la matèria orgànica.

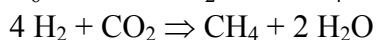
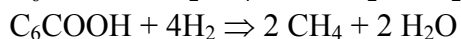
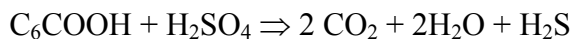
La degradació anaeròbia de la matèria orgànica en aiguamolls de flux subsuperficial és realitzat per bacteris heteròtrofs de tipus anaerobis estrictes o facultatius. Els principals organismes precursors d'aquests processos són els bacteris desnitrificants, els sulfatoreductors i els metanògens.

La fermentació metanogènica, a partir de compostos orgànics, té lloc en diverses fases. En la primera fase de la fermentació s'obtenen àcids grassos (acètic i làctic), alcohols i gasos:



El primer dels àcids a formar-se i el més abundant en els aiguamolls de flux subsuperficial és l'àcid acètic. A partir de l'àcid acètic comencen a actuar els bacteris sulfatoreductors i els formadors de metà.

Aquesta segona fase de la degradació anaeròbia de la matèria orgànica es regeix per les següents equacions:



Els bacteris que transformen la glucosa en àcids grassos (fase 1) poden adaptar-se millor a les diferents condicions ambientals de pH i temperatura que els bacteris metanògens (fase 2). Els bacteris responsables de la metanogènesis només actuen en condicions de pH entre 6.5 i 7.5, per la qual cosa si els bacteris formadors d'àcids grassos actuen a una velocitat molt superior als metanògens, l'acumulació d'àcids farà disminuir el pH i pot inhibir l'actuació dels bacteris metanògens. Es tracta doncs d'un procés l'aquilibrium del qual és inestable i pot ocasionar que no es completi tot el procés de degradació ja que només s'hagi pogut realitzar la primera fase de fermentació.

En la naturalesa existeix competència pels donadors d'electrons disponibles entre els bacteris metanògens i els sulfatoreductors, especialment per l' $H_2$  i l'acetat. En presència de sulfat, resulten sempre afavorits els reductors de sulfat, i la reacció es veu únicament limitada per la quantitat de matèria orgànica present. Alguns bacteris sulfatoreductors presenten una afinitat per l'acetat que és deu vegades superior a la dels metanògens.

En la majoria de sistemes d'aiguamolls de flux subsuperficial predominen les condicions reductores, la qual cosa és sinònim de concentracions d'oxigen dissolt molt baixes i potencials redox molt negatius. Aquestes són les condicions que s'observen en els aiguamolls que tractarà aquesta tesina.

### 3.5.3 Nitrogen

Els processos d'eliminació del nitrogen depenen de la forma en què aquest es trobi: nitrogen orgànic, nitrogen amoniacal o nitrogen en forma de nitrats.

El nitrogen orgànic està associat a la matèria en suspensió present en l'aigua residual, i per tant s'elimina per filtració. Es tracta del nitrogen que conforma les proteïnes, els carbohidrats complexos i les lignines. Part del nitrogen orgànic s'hidrolitza per formar aminoàcids que es poden descompondre, addicionalment, per produir ions amoni:  $NH_4^+$ .

El nitrogen amoniacal present en l'aigua residual es pot descompondre per diferents vies. Si es tractés de sistemes amb làmina d'aigua en contacte amb l'atmosfera i amb grans oscil·lacions de pH, podríem parlar de la volatilització de l'amoníac. Aquesta via d'eliminació només és important en el cas de llacunes d'estabilització, però no en els aiguamolls construïts, i encara menys en els de flux subsuperficial.

Per tant, les vies de degradació del nitrogen amoniacal en els aiguamolls de flux subsuperficial és l'adsorció i la posterior nitrificació biològica. L'amoníac affluent i el convertit a partir de nitrogen orgànic s'adsorbeix temporalment, mitjançant reaccions d'intercanvi iònic, sobre les partícules del medi i sobre les partícules orgàniques dotades de càrrega. Aquest amoníac pot ser consumit per la vegetació i els bacteris, o per a la conversió a nitrogen en forma de nitrat mitjançant la nitrificació biològica sota condicions aeròbiques. Degut a que la capacitat d'adsorció de l'amoníac és limitada, per alliberar l'amoníac adsorbit i poder regenerar els camps d'adsorció, és necessari que es dugui a terme un procés de nitrificació.

La nitrificació és el procés de transformació principal per la reducció de concentracions d'amoníac en els aiguamolls. La nitrificació té lloc mitjançant un procés microbià de dues fases que acaba convertint el nitrogen amoniacal en nitrats per oxidació. La

velocitat de nitrificació depèn directament de la quantitat d'oxigen dissolt en l'aigua. Si les concentracions d'oxigen dissolt són superiors a 0.3 mg/l (Reddy i D'Angelo, 1997), dos tipus de bacteris, *Nitrosomas* i *Nitrobacter*, són capaços d'oxidar l'amoni ( $\text{NH}_4^+$ ) en nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ). El procés de nitrificació total es pot resumir en una sola equació:



Segons aquesta equació d'equilibri químic, són necessaris 4.6 mg d' $\text{O}_2$  per oxidar un mg de nitrogen amoniacal a nitrat.

En els aiguamolls construïts de flux subsuperficial, la disponibilitat limitada d'oxigen redueix la seva capacitat d'eliminar l'amoníac i l'amoni per nitrificació biològica. Caldria un temps de retenció elevat en un aiguamoll d'àrea del qual fos més gran, per tal de produir un nivells baixos en el nitrogen efluent, donada una aigua residual urbana de composició típica, a menys que s'adoptessin modificacions del sistema. Aquestes modificacions poden consistir en tubs al fons de la llera per produir una aireació mecànica, la utilització d'un filtre de goteig a la grava integrat per a la nitrificació de l'amoníac i lleres de flux vertical. Aquestes lleres de flux vertical contenen grava o sorra gruixuda i es carreguen intermitentment per la superfície superior. L'aplicació intermitent i el drenatge vertical permeten recuperar les condicions aeròbiques en la llera i possibiliten que les reaccions aeròbiques tinguin lloc més ràpidament.

El nitrogen en forma de nitrats ( $\text{NO}_3^-$ ) presenta el seu estat d'oxidació més alt (+5). La càrrega global negativa del nitrat fa que no pateixi reaccions d'intercanvi iònic i que romangui dissolt en l'aigua. La naturalesa química del nitrogen en forma de nitrat és químicament estable, molt mòbil i molt soluble en l'aigua. Aquesta gran mobilitat i solubilitat són el resultat de la càrrega negativa del compost (-1). Donat que les partícules del sòl acostumen a estar carregades negativament, els nitrats no tenen afinitat per aquestes partícules i, per tant, no queden adherits al sòl. En conseqüència, els nitrats persistirien en l'aigua de l'aiguamoll si no tingués lloc cap procés d'eliminació. La via d'eliminació més important en els sistemes naturals de depuració és la desnitrificació biològica i el posterior alliberament d'òxid nítric gasós i del nitrogen molecular a l'atmosfera ( $\text{N}_2$ ). La desnitrificació es du a terme per l'acció de bacteris facultatius en condicions anòxiques. Els passos que segueix la reacció de desnitrificació es poden expressar com:



Perquè es produeixi la desnitrificació no és necessari que la totalitat del sistema sigui anòxic, ja que se sap que també es produeix en microambients anòxics propers a zones aeròbiques. No obstant això, per maximitzar la desnitrificació, cal optimitzar les condicions que afavoreixen el desenvolupament del procés.

A més de les condicions d'anòxia, per completar la reacció de desnitrificació, cal que la relació carboni/nitrogen sigui suficientment elevada, com a mínim 2:1 (en base al COT i al N total), ja que en la desnitrificació es prenen els nitrats com acceptors d'electrons per a la degradació de la matèria orgànica.

### 3.5.4 Fòsfor

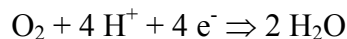
Els mecanismes d'eliminació del fòsfor es basen en temps de retenció elevats per tal de produir un efluent amb baixos nivells de fòsfor. Si l'eliminació del fòsfor és un requeriment del projecte, llavors, probablement un sistema d'aiguamolls de flux superficial sigui més efectiu. També es pot eliminar el fòsfor a partir de l'addició d'algun producte químic, mesclar l'aigua i dur-la a una llacuna de sedimentació més profunda.

### 3.5.5 Potencial Redox

El potencial redox (Eh) és una mesura de la capacitat global d'una aigua d'oxidar o reduir les substàncies que conté. Valors elevats del potencial redox indiquen que l'aigua conté compostos en estat oxidat (sulfats, nitrats, fosfats i matèria orgànica mineralitzada), mentre que valors negatius indiquen la presència d'ambients reductors.

La degradació de la matèria orgànica consisteix en reaccions d'oxidació-reducció. Els microorganismes utilitzen les reaccions de reducció (acceptació d'electrons) per a consumir els electrons procedents de l'oxidació dels seus substrats productors d'energia.

En condicions aeròbiques, les condicions redox estan controlades per la reacció de reducció de l'oxigen present:



En condicions anaeròbiques, la degradació de la matèria orgànica pot dur-se a terme per diversos processos: desnitrificació (utilització de nitrats com acceptor d'electrons en la respiració anaeròbia), per sulfato-reducció (utilització dels sulfats en la respiració anaeròbia) o per metanogènesis (fermentació), per aquest ordre seguint un augment de les condicions reductores.

Com es pot observar en aquest diagrama, segons els valors del potencial redox (Eh) predominaran més uns processos anaeròbics de degradació de la matèria orgànica o uns altres, sempre hi haurà quan hi hagi nitrats o sulfats com a acceptors d'electrons.

Els bacteris sulfato-reductors (BSR) i els metanògens (BM) competeixen per l'àcid acètic com a substrat. Els BSR tenen una afinitat per l'acetat deu vegades superior als BM, per la qual cosa, si l'àcid acètic és limitant en el sistema, els BM es veuran anul·lats per la competència amb els BSR. En el cas de que l'acètic no sigui limitant, és difícil predir quina de les dues espècies predominarà, ja que entren en joc molts paràmetres, com per exemple: la temperatura, el PH o la relació DQO/SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, entre d'altres.

En la Figura 3.6 es poden observar els processos que tenen lloc segons el potencial redox.

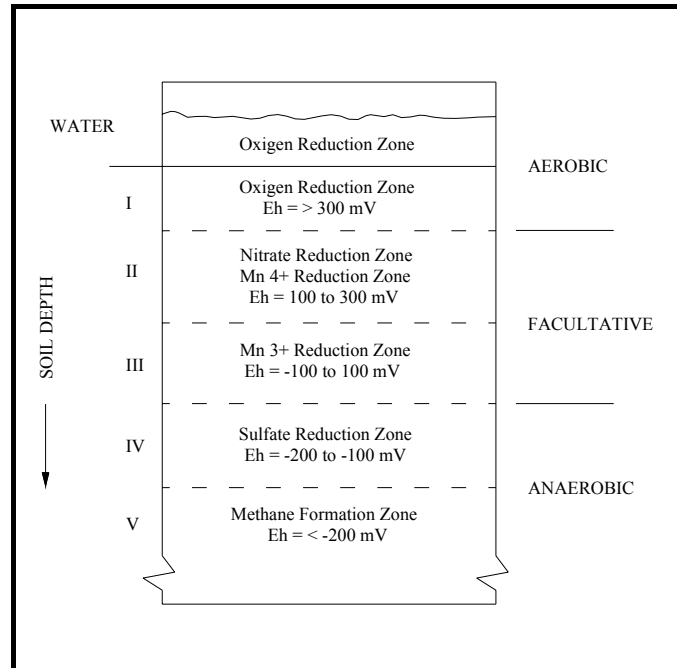


Figura 3.6 Distribució en profunditat de les reaccions d'oxidació-reducció i els corresponents valors dels potencials redox (Eh) (Kadlec i Knight, 1996).

### 3.6 pH

En 1909, el químic danès Sorensen va definir el potencial hidrogen (pH) com el logaritme negatiu de la concentració molar (més exactament de la activitat molar) dels ions hidrogen. Això és:

$$pH = -\text{Log}[H^+]$$

Des de llavors el terme pH ha sigut universalment utilitzat per la facilitat del seu ús, evitant així l'ús de xifres llargues i complexes. Per exemple, una concentració de  $[H^+] = 1 \times 10^{-8} \text{ M}$  és simplement un pH de 8 ja que  $pH = -\text{Log}[10^{-8}] = 8$ .

La relació entre pH i concentració de ions H es pot observar en la següent Figura 3.7 en la que s'inclouen valors típics d'algunes substàncies conegudes:

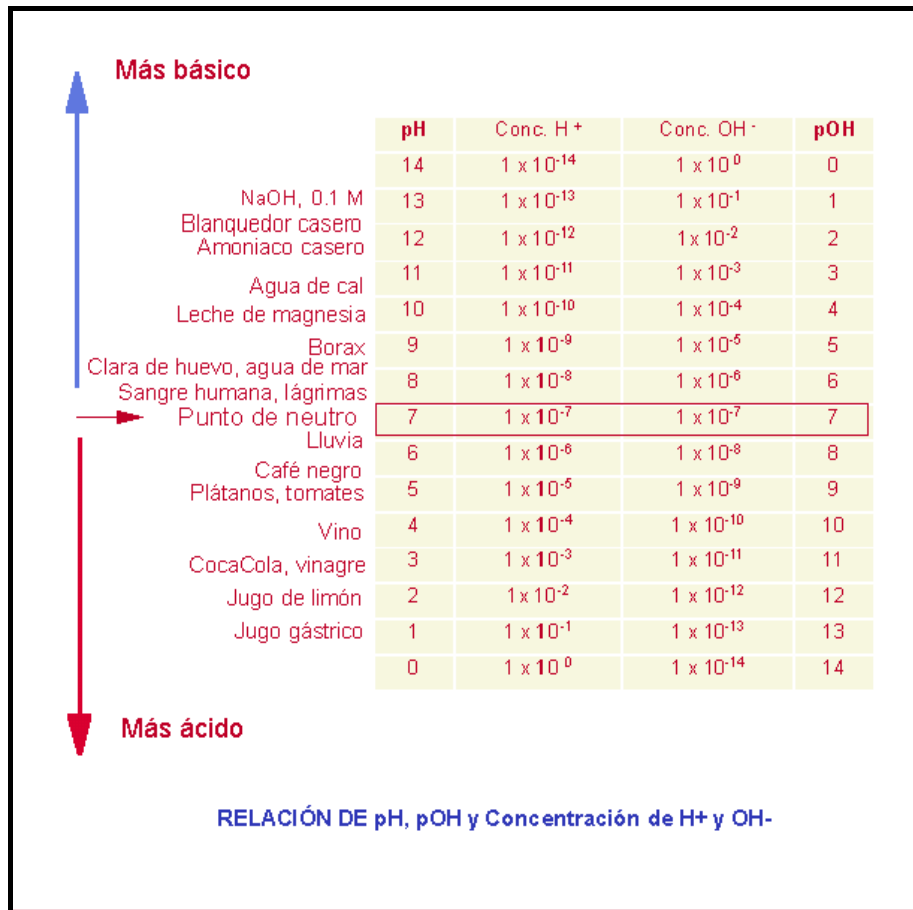


Figura 3.7 Relació de pH, pOH i concentració de ions H<sup>+</sup> i OH<sup>-</sup>

La determinació del pH en l'aigua és una mesura de la tendència a la seva acidesa o a la seva alcalinitat. No mesura en valor de l'acidesa o l'alcalinitat. Un valor de pH menor de 7.0 indica una tendència cap a l'acidesa, mentre que un valor més gran de 7.0 mostra una tendència cap a l'alcalí.

Per donar una idea de les ordres de magnitud, la majoria de les aigües naturals tenen un pH entre 4 i 9, encara que moltes d'elles tenen un pH lleugerament bàsic degut a la presència de carbonats i bicarbonats. Un pH molt àcid o molt alcalí pot ser indicatiu d'una contaminació industrial.

El valor del pH en l'aigua, és utilitzat també quan ens interessa conèixer la seva tendència corrosiva o incrustant, i en les plantes de tractament d'aigües.

### 3.6.1 El pH en els aigües

Els aspectes químics i biològics de l'aigua en els aigües estan afectats pel pH. Molts bacteris no poden sobreviure fora del seu rang de pH. Els bacteris desnitrificants tenen un major rendiment entre valors de pH 6.5-7.5 i les que realitzen la nitrificació prefereixen un pH de 7.2 i superiors. Els bacteris formadors de metà només es desenvolupen adequadament amb valors de pH compresos entre 6.6 i 7.6,



considerant-se que per sota de 6.2 aquests bacteris ja no actuen. Casos semblant succeeixen amb altres bacteris existent en els aiguamolls.

Els aiguamolls naturals presenten rangs de valors de pH compresos entre lleugerament bàsics,  $7 < \text{pH} < 8$ , i bastant àcids,  $3 < \text{pH} < 4$ . En les zones descobertes de vegetació dins d'aquests aiguamolls es poden desenvolupar alts nivell d'activitat de les algues el que provoca un augment del pH, arribant a valors superiors a 9.

Les substàncies orgàniques generades dins de l'aiguamoll durant el cicle de creixement, mort i descomposició són una font natural d'acidesa. Aquestes substàncies, àcides normalment, tenen una solubilitat baixa en condicions de pH inferiors a 7.0, amb el que precipiten. Quan aquestes condicions canvien a bàsiques, aquestes substàncies es dissolen en l'aigua esmorteint el canvi de pH (Kadlec i Knight, 1996)

### **3.6.2 El pH en els aiguamolls construïts**

Els aiguamolls construïts utilitzats pel tractament d'aigües residuals normalment tenen un pH pròxim al neutre o lleugerament àcid. Existeixen excepcions, com per exemple els aiguamolls que reben aigües àcides procedents del drenatge de mines on es veu reflexat el baix pH de les aigües afluent.

Els aiguamolls de flux subsuperficial, al igual que els de flux superficial, tenen la capacitat d'esmorteir les variacions de pH de l'aigua residual entrant.

Si s'estudia aquesta capacitat d'esmortiment al llarg del temps, s'observa que en el primer any de vida dels aiguamolls aquesta capacitat és nul·la. Un cop passat el primer cicle de les plantes, degut a la descomposició dels seus restes, la capacitat d'esmortiment comença a funcionar.

## **3.7 Alcalinitat**

L'alcalinitat en el aigua, tant natural com tractada, usualment es causada per la presència de ions carbonats ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) i bicarbonats ( $\text{HCO}_3^-$ ), associats amb els cations  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  i  $\text{Mg}^{+2}$ .

L'alcalinitat es determina per titulació de la mostra amb una solució valorada d'un àcid fort com l'àcid clorhídric, HCl, o l'àcid sulfúric,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , mitjançant un o dos punts successius d'equivalència, indicats ja sigui per mitjans potenciomètrics o per mitjà del canvi de color utilitzant dos indicadors àcid-base adequats.

## **3.8 Emissions de metà en els aiguamolls construïts**

Els aiguamolls naturals, agrícoles i els residus ramaders, representen el 21%, 11% i 5%, respectivament, de les emissions globals de gas metà a l'atmosfera (IPCC, 1995). En particular, els aiguamolls naturals emeten  $109 \cdot 10^{12}$  g/any de metà. Com a gas d'efecte hivernacle, el metà contribueix en gran mesura al potencial escalfament futur de la Terra. La seva concentració en l'atmosfera s'ha més que doblat al llarg dels últims dos

segles (després d'haver estat més o menys constant durant els 2000 anys anteriors) i continua creixent. Després del diòxid de carboni, el metà és el segon gas que més contribueix a l'efecte hivernacle, però cal tenir present que el metà té un potencial d'escalfament global (GWP) 62 vegades superior al CO<sub>2</sub>, en base a l'emissió d'una mateixa massa i en un temps horitzó de 20 anys (IPCC,1995).

Els aiguamolls construïts per al tractament d'aigua residual són un sistema que ja s'utilitza en molts estats d'Europa i Estats Units i que està emergent en els països en vies de desenvolupament (per exemple, a Xina) ja que es tracta d'un procés innovador i alternatiu gràcies als beneficis econòmics, socials i ambientals que té associat (Pei-dong et al., 2002). Tot i això, es coneix poc sobre la importància dels processos metanògens que tenen lloc en aquests aiguamolls i les emissions de metà generades.

El procés de depuració que té lloc en aiguamolls construïts té associat altes velocitats de conversió de la matèria orgànica i nitrogen en productes finals gasosos (Tanner et al, 1997). Diversos estudis duts a terme en diferents plantes corroboren que els aiguamolls construïts per al tractament d'aigües residuals produeixen gasos d'efecte hivernacle, com són el metà (CH<sub>4</sub>), òxid nitrós (N<sub>2</sub>O), el monòxid de carboni (CO) i el diòxid de carboni (CO<sub>2</sub>) en quantitats superiors als aiguamolls naturals, ja que el contingut en matèria orgànica i nitrogen de les aigües residuals és aproximadament 10 vegades superior al de les aigües d'un aiguamoll natural (Pei-dong et al., 2002).

Per altra banda, la producció de metà és el pas final en la degradació anaeròbia de la matèria orgànica. Com ja s'ha explicat en apartats anteriors, la matèria orgànica en condicions d'anòxia pateix una primera fase de fermentació àcida, on es produeixen diferents àcids grassos (principalment àcid acètic) que en una segona fase passen a metà gràcies a l'acció dels bacteris metanògens. Si aquesta segona fase no té lloc, no podem parlar de degradació total de la matèria orgànica.

Observem, doncs, la importància d'estudiar i mesurar els fluxos biogènics dels productes gasosos que es produeixen als aiguamolls construïts que tracten aigües residuals urbanes, tant per comprendre els processos microbians que tenen lloc en aquests sistemes, com per determinar l'impacte de gasos com el metà sobre l'escalfament de la Terra.

### **3.9 Matèria Orgànica**

L'eliminació de la matèria orgànica es el principal objectiu dels aiguamolls construïts com a tractament secundari d'aigües residuals domèstiques. Entre d'altres substàncies orgàniques, en un aigua residual es poden trobar carbohidrats, grasses animals, olis, fenols, proteïnes, agents tenso-actius, pesticides i productes agrícoles.

La matèria orgànica que entra en els aiguamolls es pot dividir en partícules i dissolta. La matèria orgànica en partícules forma part de la matèria en suspensió, MES, pel que té els seus mateixos mecanismes d'eliminació mentre que la dissolta s'elimina per mitjà de la respiració microbiana.

### 3.9.1 Mètodes d'anàlisis de la matèria orgànica

S'utilitzen diferents tècniques per determinar la matèria orgànica d'un aigua residual. Un mètode comú consisteix en la determinació de la fracció volàtil de la matèria sòlida total. Aquesta tècnica té unes interferències importants i errors propis del mètode, pel que cal molta atenció en la interpretació dels resultats.

Quan es desitja conèixer de forma més precisa el contingut de matèria orgànica d'un aigua, els mètodes d'anàlisis són:

- La Demanda Bioquímica d'Oxigen (DBO).
- La Demanda Química d'Oxigen (DQO).
- El Carboni Orgànic Total (COT).

L'assaig de la DBO mesura l'oxigen consumit durant un període de temps especificat per degradar bioquímicament la matèria orgànica (demanda carbonosa) d'una mostra d'aigua, així com l'oxigen utilitzat per oxidar la matèria orgànica present en la mostra (per exemple sulfurs). L'assaig també mesura l'oxigen consumit per oxidar l'amoníac i els nitrats de la mostra (demanda nitrogenada), sempre i quan no s'inhibeixi aquest procés amb un inhibidor.

El temps utilitzat normalment és de 5 dies i els resultats obtinguts es denominen DBO<sub>5</sub>.

Taula 3.3 Percentatges d'oxidació del acetat per diverses vies en un aigüamoll construït de flux subsuperficial (adaptada de Kadlec i Knight, 1996)

Reacció	Ambient ric en Nitrats			
	Alta carrega de Carboni		Baixa carrega de Carboni	
	Plantes	No Plantes	Plantes	No Plantes
O <sub>2</sub>	23,2	25,6	36,1	32,8
Nitrat - Reducció	70,6	69,3	51,7	56,0
Sulfat - Reducció	3,0	3,1	2,3	2,3
Reducció del Ferro	0,1	0,0	0,1	0,1
Metanogènesis	0,0	0,0	0,0	0,0
Biomassa Bacteriana	3,1	2,0	9,8	8,8
Total	100,0	100,0	100,0	100,0

Reacció	Ambient ric en Sulfats			
	Alta carrega de Carboni		Baixa carrega de Carboni	
	Plantes	No Plantes	Plantes	No Plantes
O <sub>2</sub>	40,7	31,7	44,5	13,5
Nitrat - Reducció	0,0	0,0	0,0	0,0
Sulfat - Reducció	37,8	34,1	50,6	82,7
Reducció del Ferro	0,1	0,1	0,2	0,2
Metanogènesis	19,6	32,1	0,0	0,0
Biomassa Bacteriana	1,8	2,0	4,7	3,6
Total	100,0	100,0	100,0	100,0

L'assaig de la DQO mesura la quantitat d'oxigen necessària per oxidar químicament la matèria orgànica present en una mostra d'aigua mitjançant un oxidant químic fort (normalment dicromat de potassi) i a temperatura d'ebullició. Els resultats de la DQO normalment són més grans que els de la DBO degut a que el nombre de compostos que es poden oxidar químicament és més gran que els que es poden oxidar biològicament. Per a un aigua es pot establir una correlació entre la DBO i al DQO el que ofereix una avantatge ja que mentre que la determinació de la DBO exigeix 5 dies, la de la DQO requereix únicament unes hores.

L'assaig del COT es realitza injectant una quantitat coneguda de mostra en un forn a alta temperatura, on el carboni orgànic s'oxida a diòxid de carboni en presència d'un catalitzador. El diòxid de carboni així produït es determina amb un analitzador d'infraroigs. Aquest assaig és aplicable únicament a petites concentracions de matèria orgànica i té l'avantatge de poder realitzar-se en un termini de temps molt breu (Mujeriego et al., 2000).

Els aiguamolls aconseguixen excel·lents reduccions en la DBO<sub>5</sub> i en la DQO. No obstant, no aconseguixen eliminar per complet la matèria orgànica, sempre existeix una concentració de fons de matèria orgànica (per exemple les restes de plantes, etc.). Valors típics de concentracions de fons són de 1 a 6 mg/l per la DBO<sub>5</sub> i de 30 a 100 mg/l per la DQO (Kadlec i Knight, 1996).

### 3.9.2 *Evolució de la matèria orgànica dins d'un aiguamoll*

Mitjançant les dades obtingudes dels estudis de diferents aiguamolls de flux subsuperficial s'obté que la millor manera d'estimar l'evolució de la matèria orgànica és mitjançant models que contemplen l'eliminació com una cinètica de primer ordre i en condicions hidràuliques de flux en pistó.

Un model d'aquest tipus és el obtingut per Kadlec i Knight (1996). En aquest model es suposa l'existència d'una concentració de fons i la seva expressió és la següent:

$$\ln\left(\frac{C_o - C^*}{C_i - C^*}\right) = -k \cdot t \cdot y$$

On:

- $C_o$  és la concentració de DBO<sub>5</sub> en l'afluent, en mg O<sub>2</sub>/l.
- $C^*$  és la concentració de fons de DBO<sub>5</sub> en l'aiguamoll, en mg O<sub>2</sub>/l.
- $C_i$  és la concentració de DBO<sub>5</sub> en el punt  $i$  de l'aiguamoll, en mg O<sub>2</sub>/l.
- $k$  és la constant cinètica de primer ordre, en d<sup>-1</sup>.
- $t$  és el temps de permanència hidràulica, en d.
- $y$  és la fracció de la distància del punt  $i$  respecte la total, adimensional.

Aquest model proposa també una expressió per obtenir la concentració de fons. La concentració de fons correspon a la DBO<sub>5</sub> que s'obtidria amb temps de permanència hidràulics molt elevats. L'expressió és la següent:

$$C^* = 3,5 + 0,053 \cdot C_o$$

$$0 \leq C_o < 200 \text{ mg/l}$$

En la figura 3.X s'observa l'evolució de la DBO<sub>5</sub> al llarg d'un aiguamoll i l'ajust mitjançant el model de Kadlec i Knight (1996). L'ajust del model es va realitzar mitjançant els valors de la DBO<sub>5</sub> en l'efluent i en l'afluent (minimitzant l'error quadràtic dels dos paràmetres del model) per a comprovar el grau de concordança entre els valors experimentals i els corresponents al model en els diferents punts de mostreig.

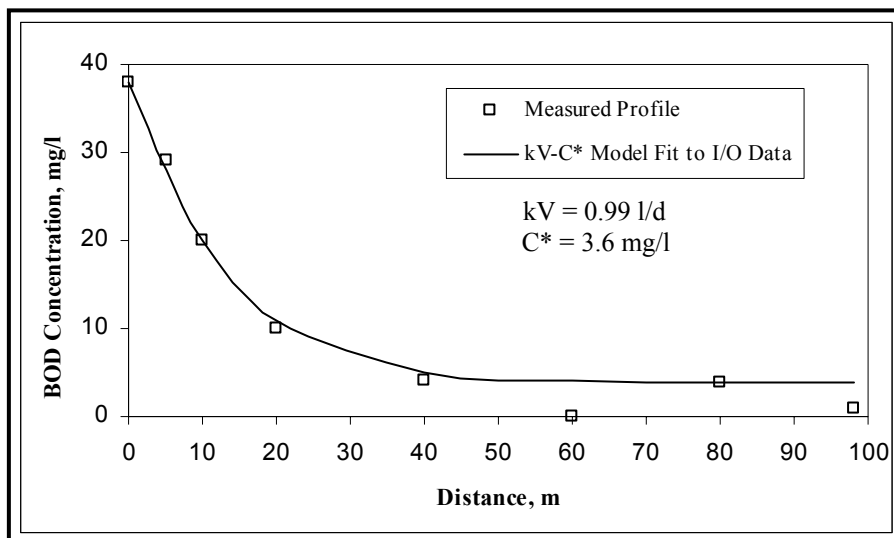


Figura 3.8 Evolució de la DBO<sub>5</sub> en un aiguamoll construït de flux subsuperficial (Kadlec i Knight, 1996).

### 3.9.3 Rendiment

Els rendiments que s'obtenen amb els aiguamolls construïts de flux subsuperficial són del ordre del 85 % (Píriz, 2000). Cal destacar que, al igual que la MES, la major part de la reducció de la matèria orgànica es produeix en els primers metres del aiguamoll on la matèria en partícules queda retinguda entre els forats del medi granular.

Un altre aspecte important és que en els aiguamolls, tant en els superficials com en els subsuperficials, es produeix matèria orgànica degut a la descomposició de les restes de les plantes. Això fa impossible aconseguir en aquests sistemes una reducció completa de la DBO<sub>5</sub>. Aquest efecte és més important en els aiguamolls superficials, ja que no existeix un medi granular que limiti el contacte de l'aigua amb aquesta matèria orgànica.

Per últim, s'ha de destacar la capacitat del aiguamolls per absorbir puntes de matèria orgànica. Una vegada que el aiguamoll ha passat la seva fase inicial i està estabilitzat, és capaç de suportar puntes de matèria orgànica obtenint-se efluent amb una DBO molt constant.