Resum

Aquest projecte pretèn analitzar quina és la situació actual de la problemàtica de la contaminació per nitrats als aqüífers de Catalunya.

Per això, s'han marcat dos objectius principals:

- Realitzar un estudi dels nivells actuals de contaminació per nitrats als aqüífers de Catalunya.

- Analitzar les tres MTD's (millors tècniques disponibles) per l'eliminació de nitrats en aigües de consum.

Llavors, per aconseguir complir els objectius marcats, el projecte s'ha estructurat de la següent forma:

Primer de tot s'ha realitzat una revisió de la problemàtica de la presència de nitrats a les aigües, on s'han estudiat els principals problemes d'afectació a la salut humana derivats de l'exposició als nitrats, la legislació actual respecte la concentració de nitrats en aigües potables, i les diferents tecnologies existents per l'eliminació de nitrats en aigües de consum humà.

A continuació s'ha estudiat la situació actual de la problemàtica als aqüífers de Catalunya, tot analitzant les 9 zones vulnerables en relació amb la contaminació de nitrats, establertes al Decret 476/2004. A partir d'aquest anàlisis, s'han classificat les 9 zones en diferents graus d'afectació, i s'ha escollit com a cas d'estudi un municipi de la zona més afectada.

Llavors, a partir d'aquest cas d'estudi s'han dissenyat les plantes d'eliminació de nitrats, mitjançant les tres MTD's (millors tècniques disponibles) recomenades per l'Agència Europea del Medi Ambient, les quals són Intercanvi Iònic, Òsmosi Inversa i Electrodiàlisis Reversible.

Un cop dissenyades les tres plantes, s'ha analitzat el seu funcionament, mitjançant codis numèrics en suport informàtic per l'intercanvi iònic i l'òsmosi inversa, i amb càlculs teòrics en entorn excel per l'electrodiàlisis reversible.

Finalment, amb les dades obtingudes en aquest anàlisis de les diferents plantes, s'ha pogut realitzar una comparació tècnica, econòmica i medi ambiental entre les tres tecnologies, per determinar els aventatges i inconvenients de cadascuna d'elles.

Sumari

RESUM 1

SUMARI 3

1. INTRODUCCIÓ 7

1.1. El cicle del nitròg en 7
1.2. El cicle del nitròg en al sòl i a les aigües subterrànies....11
1.3. Orígen dels nitrats presents a les aigües subterrànies....13
1.4. Afectació a la salut humana en relació a l'exposició als nitrats 14
1.5. Legislació respecte la concentració de nitrats en aigües potables....16
1.6. Tecnologies per l'eliminació de nitrats en aigües potables....17
1.7. Objectius i estructuració del projecte 18

2. ANÀLISI DE LA SITUACIÓ ACTUAL DE LA PROBLEMÀTICA DE LA CONTAMINACIÓ PER NITRATS ALS AQÜÍFERS DE CATALUNYA 19

2.1. Estudi sobre els nivells de contaminació per nitrats als aqüífers de les zones vulnerables de Catalunya 21
2.1.1. Àrea 1.... 25
2.1.2. Àrea 2.... 28
2.1.3. Àrea 3.... 31
2.1.4. Àrea 4.... 34
2.1.5. Àrea 5.... 37
2.1.6. Àrea 6.... 39
2.1.7. Àrea 7.... 43
2.1.8. Àrea 8.... 45
2.1.9. Àrea 9.... 47
2.2. Classificació de les zones vulnerables de Catalunya segons el seu nivell d'afectació 50
2.2.1. Zones poc afectades.... 50
2.2.2. Zones força afectades 50
2.2.3. Zones molt afectades.... 51
2.2.4. Zona d'afectació extrema.... 51
2.3. Elecció d'un cas d'estudi 52
2.3.1. Parametrització de l'aigua a tractar.... 54
2.3.2. Cabal d'aigua a tractar 55

3. DISSENY D'UNA PLANTA D'ELIMINACIÓ DE NITRATS MITJANÇANT INTERCANVI IÒNIC ____ 56
3.1. Introducció a la tecnologia ... 56
3.2. Descripció del procés ... 60
3.2.1. Pre-tractament ... 60
3.2.2. Eliminació de nitrats mitjançant intercanvi iònic ... 68
3.2.3. Post-tractament ... 82
3.3. Diagrama de flux de la planta ... 85
3.4. Fitxes d'equips ... 86

4. DISSENY D'UNA PLANTA D'ELIMINACIÓ DE NITRATS MITJANÇANT ÒSMOSI INVERSA ____ 89
4.1. Introducció a la tecnologia ... 89
4.2. Descripció del procés ... 93
4.2.1. Pre-tractament ... 93
4.2.2. Eliminació de nitrats mitjançant òsmosi inversa ... 98
4.2.3. Post-tractament ... 110
4.3. Diagrama de flux de la planta ... 112
4.4. Fitxes d'equips ... 113

5. DISSENY D'UNA PLANTA D'ELIMINACIÓ DE NITRATS MITJANÇANT ELECTRODIÀLISIS REVERSIBLE ____ 115
5.1. Introducció a la tecnologia ... 115
5.2. Descripció del procés ... 119
5.2.1. Pre-tractament ... 119
5.2.2. Eliminació de nitrats mitjançant electrodiàlisis reversible ... 123
5.2.3. Post-tractament ... 128
5.3. Diagrama de flux de la planta ... 129
5.4. Fitxes d'equips ... 130

6. COMPARACIÓ TÈCNICA, ECONÒMICA I MEDI-AMBIENTAL ENTRE LES TRES TECNOLOGIES ESTUDIADES ____ 133
6.1. Comparació tècnica ... 133
6.2. Comparació medi ambiental ... 138
6.3. Comparació econòmica ... 141
6.3.1. Planta d'eliminació de nitrats mitjançant intercanvi iònic ... 142
6.3.2. Planta d'eliminació de nitrats mitjançant òsmosi inversa ... 145
6.3.3. Planta d'eliminació de nitrats mitjançant electrodiàlisis reversible ... 148

7. ESTIMACIÓ DEL PRESSUPOST PER REALITZAR L'ESTUDI ___ 151

8. CONCLUSIONS _____ 152

BIBLIOGRAFIA_____ 155

1. Introducció

La contaminació de les aigües subterrànies és una preocupació creixent a tot el món. Els aqüífers subterranis són essencials, tant en l'agricultura, com també en la potabilització d'aigua pel consum humà.

Els nitrats són un dels contaminants de les aigües subterrànies més habituals i problemàtics. La situació és especialment crítica en diverses zones de la Unió Europea, Estats Units, Canadà, Àfrica, l'Orient Mitjà, Austràlia i Nova Zelanda (Faillat, 1990 ; Briskin, 1991 ; Gillham, 1991 ; Fried, 1991 ; Dillon et al, 1991 ; Spalding i Exner, 1991, 1993 ; Nixon, 1992 ; Cohen, 1992 ; Canter, 1997).

Per comprendre la problemàtica de la contaminació per nitrats de les aigües subterrànies, és important tenir en compte els següents conceptes:

- el cicle del nitrògen en la natura, des d'un punt de vista químic i microbiològic.
- les interaccions existents en el cicle del nitrògen amb el sòl i les aigües subterrànies.
- les causes naturals i antropològiques de contaminació de nitrats en els aqüífers.
- els problemes d'afectació a la salut humana derivats de l'exposició als nitrats.

1.1. El cicle del nitrògen

El nitrògen pot estar present de diverses formes al medi ambient. El moviment i les transformacions d'aquests diferents compostos de nitrògen a través de la biosfera es poden caracteritzar mitjançant el cicle del nitrògen, el qual es pot observar a continuació, en la figura 1.1.

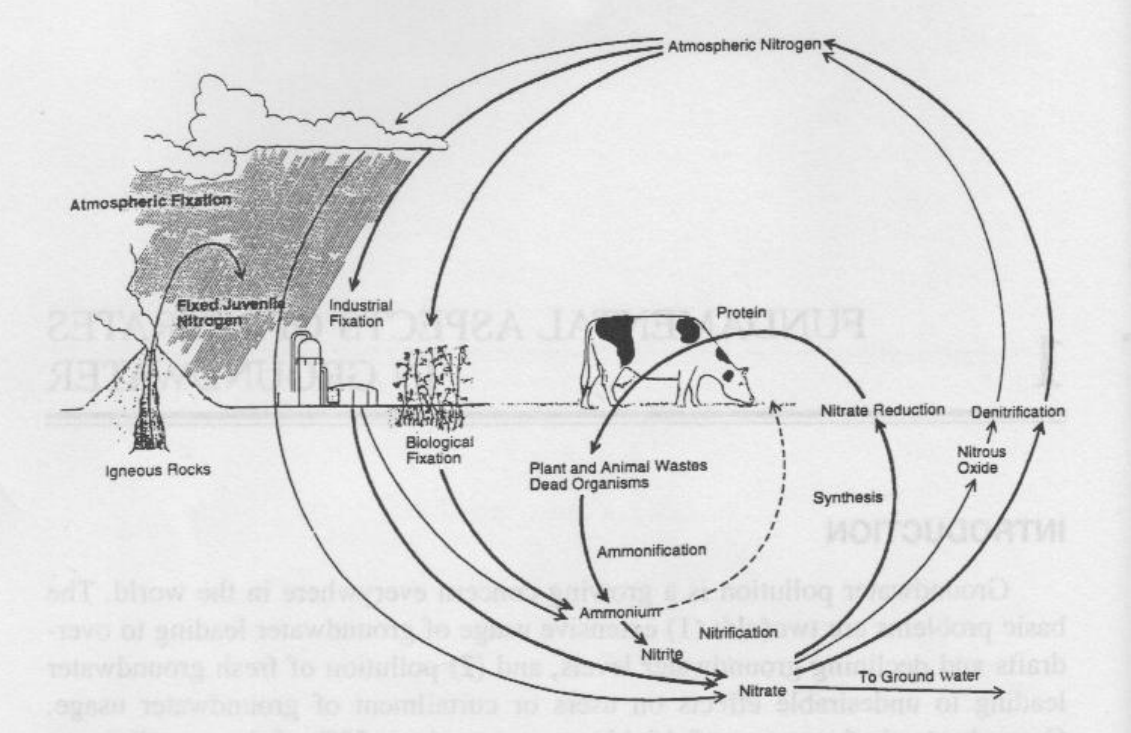


Figura 1.1 *Cicle del nitrògen* (U.S. Environmental Protection Agency, 1994)

L'atmòsfera serveix com a reserva de nitrògen, en forma de nitrògen gas molecular (un 79% de l'atmòsfera és N_2). El nitrògen atmosfèric s'ha de combinar amb hidrògen o oxígen per tal de poder ser assimilat per les plantes, les quals, a continuació, són consumides pels animals.

El nitrògen pot formar una àmplia gamma de compostos diferents, depenent del seu estat d'oxidació. Els principals compostos de nitrògen són:

Compost de nitrògen	Fòrmula	Estat d'oxidació
Amoniac	NH_3	-3
Catió amoni	NH_4^+	-3
Nitrògen molecular	$N_{2\ (g)}$	0
Anió nitrit	NO_2^-	+3
Anió nitrat	NO_3^-	+5

Taula 1.1 *Relació dels principals compostos de nitrògen, amb el seu estat d'oxidació*

Les transformacions entre els diversos compostos de nitrògen poden esdevenir mitjançant diferents mecanismes: fixació, amonificació, síntesi, nitrificació i desnitrificació. Cadascun d'aquests mecanismes és provocat per diferents tipus de microorganismes, generant-se un guany o una pèrdua d'energia. Aquestes variacions energètiques són bàsiques per determinar quina reacció succeirà.

La **fixació** del nitrògen es refereix a la conversió del nitrògen gasós atmosfèric cap a algun compost assimilable per plantes i animals. El principal mecanisme de fixació és biològic, mitjançant microorganismes que porten a terme una conversió biològica del nitrògen gas molecular en compostos orgànics de nitrògen. Tot i això, també són importants els sistemes de fixació provocats per intervenció humana degut a mètodes industrials i per irradiació solar. La fixació per irradiació solar genera anions nitrat, mentres que la fixació per mètodes industrials origina cations amoni o anions nitrat.

Fixació:

N_2 gas atmosfèric	$\rightarrow$ mecanisme biològic $\rightarrow$	compostos orgànics de nitrògen
N_2 gas atmosfèric	$\rightarrow$ irradiació solar $\rightarrow$	NO_3^-
N_2 gas atmosfèric	$\rightarrow$ mètodes industrials $\rightarrow$	NH_4^+ , NO_3^-

L'**amonificació** comporta la transformació del nitrògen orgànic en amoni i amoniac. Generalment, l'amonificació és deguda a la descomposició de restes animals i vegetals, i de defeccions fecals d'animals. Aquesta descomposició del nitrògen orgànic en amoni i amoniac, és provocada per microoganismes.

Amonificació: Nitrògen orgànic $\rightarrow$ (microorganismes) $\rightarrow$ NH_3 i NH_4^+

La **síntesi** utilitza mecanismes bioquímics per convertir l'amoni, l'amoniac i els nitrats en proteïnes vegetals i altres compostos nitrogenats.

Síntesi: NO_3^-, NH_3 i NH_4^+ + $CO_{2\,(g)}$ + Llum solar $\rightarrow$ Proteïnes vegetals

Aquestes proteïnes vegetals són essencials en les xarxes tròfiques, ja que excepte en molt pocs casos, els animals no són capaços de transformar el nitrògen inorgànic en alguna forma orgànica de nitrògen, de manera que només poden aconseguir proteïnes a través de l'ingesta de plantes o altres animals.

La **nitrificació** és una oxidació biològica dels cations amoni en dues etapes. En la primera etapa l'amoni s'oxida a nitrit, mentres que en la segona etapa el nitrit s'oxida a nitrat. La cinètica de la segona reacció és molt superior a la de la primera, i per això, la presència de cations nitrat acostuma a ser molt superior a la de cations nitrit.

Nitrificació: $NH_4^+ + O_{2\,(g)} \rightarrow$ (bacteries nitrosoma) $\rightarrow NO_2^- + O_{2\,(g)} \rightarrow$ (bacteries nitrobacter) $\rightarrow NO_3^-$

Els nitrats generats en la nitrificació poden ser usats en la síntesi de proteïnes vegetals durant el creixement de les plantes, o sinó, es poden reduïr a nitrògen molecular en la desnitrificació.

La **desnitrifació** genera una reducció biològica dels anions nitrat a nitrògen gas molecular, mitjançant bacteries heteròtrofes, que requereixen una font de carbó orgànic.

Desnitrificació: NO_3^- + carbó orgànic $\rightarrow$ NO_2^- + carbó orgànic $\rightarrow$ $N_{2\,(g)} + CO_{2\,(g)} + H_2O$

Cal tenir en compte que si al medi hi ha oxígen i nitrats, les bacteries heteròtrofes prefereixen oxidar el carbo orgànic mitjançant oxígen. Per això, per tal que es produeixi el procés de desnitrificació, són necessàries condicions d'anòxia, amb absència d'oxígen.

Per altra banda, els principals mecanismes de transport del nitrògen a través del medi ambient són la pluja, la sedimentació en sistemes aquàtics, el vent, els corrents d'aigües subterrànies i superficials, i la volatilització.

I les principals condicions ambientals que afecten els mecanismes de transport i transformació dels compostos de nitrògen en el medi ambient són la temperatura, el pH, la flora microbiana, el potencial Redox, i la presència de matèria carbonosa, nutrients i oxígen.

1.2. El cicle del nitrògen al sòl i a les aigües subterrànies

Els principals aspectes del cicle del nitrògen associat al sòl i les aigües subterrànies es poden observar a continuació, en la figura 1.2.

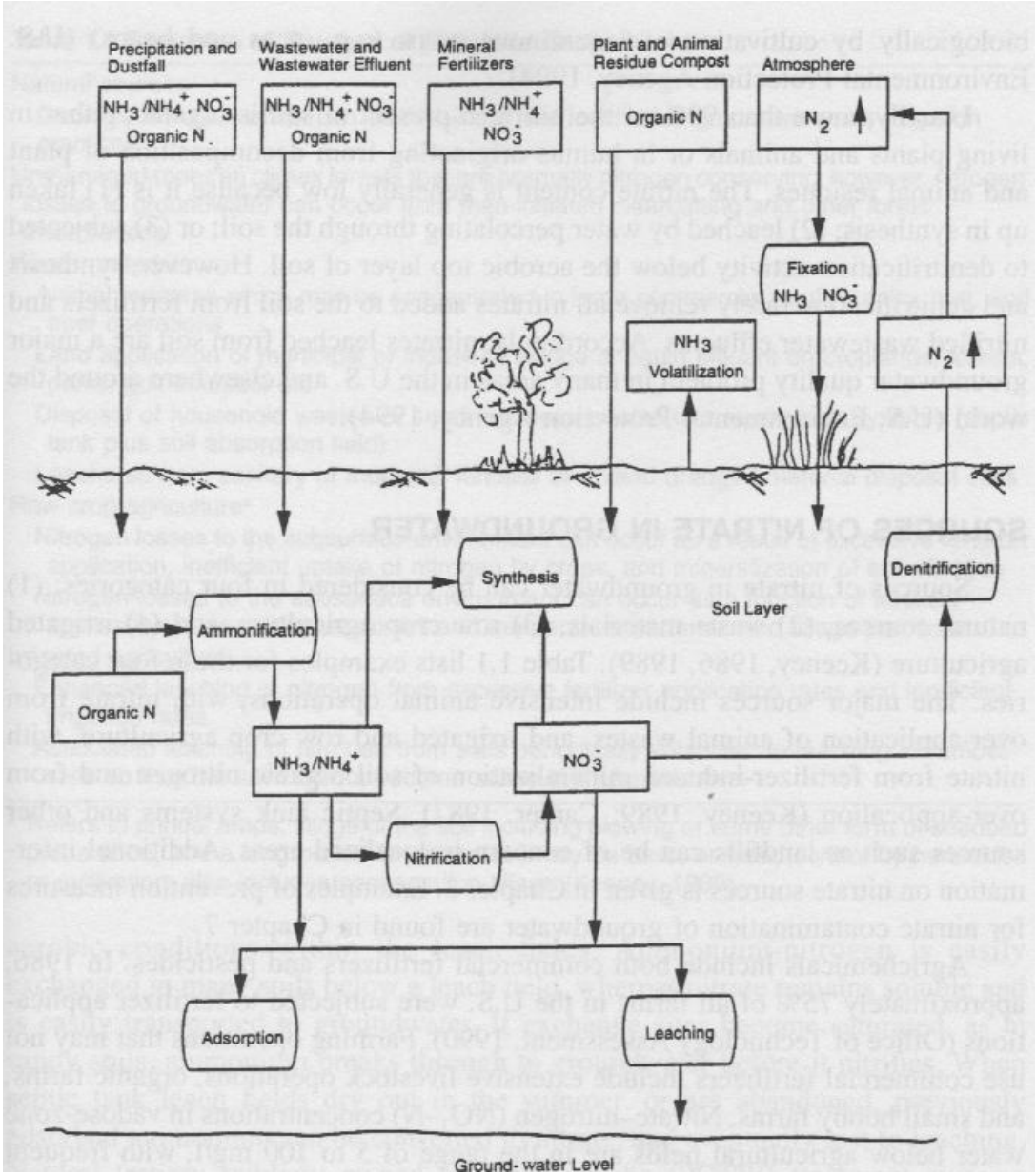


Figura 1.2 *Cicle del nitrògen al sòl i a les aigües subterrànies*
(U.S. Environmental Protection Agency, 1994)

El nitrògen es pot fixar al medi terrestre mitjançant:

- aigües residuals no tractades o efluents de depuradora
- fertilitzants comercials
- restes vegetals o animals
- la pluja
- les escombraries

A més, les bacteries fixadores de nitrògen presents al sòl, també converteixen nitrògen gas molecular en compostos orgànics de nitrògen que s'acumulen al medi terrestre.

Per altra banda, l'home ha incrementat la quantitat de nitrògen fixat al medi terrestre, mitjançant el cultiu de llegums com els pèsols i les mongetes, que afavoreixen la fixació de nitrògen al sòl.

Normalment, més del 90 % del nitrògen present al medi terrestre està en forma orgànica, mentres que el contingut de nitrat és força baix, degut a que:

- s'utilitza en la síntesi de proteïnes vegetals per part de les plantes
- avança per lixiviació fins als aqüífers presents al medi
- pateix reaccions de desnitrificació a les zones aeròbiques del medi terrestre

Tot i això, la fotosíntesi de les plantes i la desnitrificació de les bacteries difícilment pot eliminar tots els nitrats presents al sòl, i aquests percolen a través del medi terrestre fins arribar a les aigües subterrànies, on es van acumulant al llarg del temps.

1.3. Orígen dels nitrats presents a les aigües subterrànies

Les fonts responsables de la presència de nitrats a les aigües subterrànies es poden dividir en tres grups (Canter, 1997):

- Fonts d'orígen natural
    - El nitrògen geològic present als minerals i les roques, pot avançar per lixiviació a través del sòl i arribar a les aigües subterrànies, degut a la pluja o a pràctiques d'irrigació per part de l'home.
    - El nitrògen emmagatzemat de forma natural als boscos, pot avançar cap a les aigües subterrànies, degut a la desforestació i altres alteracions dels boscos.

- Fonts d'orígen residual
    - Tractaments no adequats dels fems d'animals provinents de la ramaderia.
    - Aigües residuals no tractades o efluents de depuradora.
    - Utilització inadequada dels fangs generats en depuradores.
    - Disposicions no adequades de fosses sèptiques.
    - Tractaments no adequats de les escombraries i els residus sòlids urbans.

- Fonts d'orígen agrícola
    - Ús excessiu de fertilitzants nitrogenats en l'agricultura intensiva.
    - Cultiu de llegums com els pèsols i les mongetes, que afavoreixen la fixació de nitrògen al sòl.

1.4. Afectació a la salut humana en relació a l'exposició als nitrats

La toxicitat dels nitrats és deguda a la capacitat del cós humà per reduir-los a nitrits. Aquesta reacció es produeix a la saliva de la boca, i també té lloc a l'estòmac dels infants durant els seus primers tres mesos de vida.

La toxicitat dels nitrits és deguda a efectes cardiovasculars a elevades concentracions, i a la metahemoglobinemia a baixes dosis.

Llavors, la metahemoglobinemina és el principal risc per la salut humana degut a una elevada presència de nitrats en les aigües de consum (Winneberger, 1982 ; Terblanche, 1991 ; Bouchard et al, 1992).

La metahemoglobinemia es refereix al procés mitjançant el qual l'hemoglobina s'oxida a metahemoglobina. Quan la concentració de metahemoglobina a la sang augmenta, el nivell d'oxígen disminueix, podent arribar a produir-se cianosis, malaltia referida a la falta d'oxígen a la sang.

Tot i això, els efectes de la metahemoglobina són ràpidament reversibles, i a més, no són acumulatius.

Per això, el principal grup de risc són els infants durant els seus primers tres mesos de vida, ja que és durant aquest període quan el cós humà té una major capacitat per generar metahemoglobina a partir dels nitrats.

Durant els primers tres de mesos de vida, un infant converteix aproximadament un 10 % dels nitrats consumits en nitrits. Llavors, són aquests nitrits els que es combinen amb l'hemoglobina de la sang per generar metahemoglobina.

Com ja s'ha comentat, a mesura que la concentració de metahemoglobina a la sang augmenta, la capacitat de transport i transmissió d'oxígen disminueix. Llavors, l'infant pateix anoxia cel·lular, i en conseqüència, cianosis (i el color de la pell es torna blavós degut a la manca d'oxígen, efecte pel qual la malaltia també es coneix com a *síndrome del bebé blau*). Aquest fenòmen pot succeïr en infants, quan aproximadament un 10 % del total de l'hemoglobina s'ha convertit en metahemoglobina (Organització Mundial de la Salut, 1985).

Altres factors que incrementen el risc dels infants menors de tres mesos envers la metahemoglobinemia són (Keeney, 1986):

- l'enzima que contrarresta els efectes, reduint la metahemoglobina a hemoglobina, actua amb menor activitat.

- l'hemoglobina de l'infant té una major susceptibilitat a oxidar-se a metahemoglobina.

- el pH dels infants a l'estòmac i els intestins és major que en els adults, provocant una major activitat de les bacteries reductores dels nitrats a nitrits.

Per altra banda, també és important destacar que diversos estudis han relacionat l'ingestió de nitrits (i nitrats amb amines) amb l'aparició de càncers en diferents òrgans del cós humà, basant-se en els compostos N-nitrosos com els precursors cancerígens (Fraser et al, 1980 ; Tannenbaum i Green, 1985 ; Pontius, 1993).

La presència de nitrats en l'aigua potable s'ha relacionat amb càncer gàstric a Colòmbia i Anglaterra, i l'exposició a fertilitzants nitrogenats també s'ha relacionat amb l'aparició de càncer gàstric a Xile.

Tot i això, cal dir que actualment no es pot assegurar que hi hagi una correlació directa entre l'ingestió de nitrats i l'aparició de càncer gàstric, ja que hi ha molts altres factors dietètics i relacionats amb l'entorn de l'afectat, que intervenen en el procés cancerígen.

Les investigacions actuals es centren en la tesi dels nitrits com a precursors de nitrosamines cancerígenes i altres compostos N-nitrosos. Els nitrits reaccionen amb amines i amides, generant compostos N-nitrosos, els quals es consideren substàncies cancerígenes.

1.5. Legislació respecte la concentració de nitrats en aigües potables

Quan es consulten els límits màxims permesos de nitrats en les aigües de consum humà, cal tenir en compte que la concentració de nitrats es pot expressar directament en nitrats (NO_3^-) o en nitròger en forma nitrat ($N\text{-}NO_3^-$).

La legislació respecte la concentració de nitrats en aigües potables és bastant homogènia en tot el món, ja que es segueixen els límits marcats per l'Organització Mundial de la Salut (OMS).

L'OMS considera que quan la concentració de nitrats en l'aigua potable supera els 10 mg/l $N\text{-}NO_3^-$, l'increment del nivell de metahemoglobina en la sang és excessiu, i pot provocar problemes en la salut humana.

Per això, l'OMS situa el nivell màxim permès de nitrats en l'aigua potable, en una concentració de 10 mg/l $N\text{-}NO_3^-$.

Seguidament es poden observar els límits establerts per l'OMS, la UE i els EUA, en relació a la concentració màxima permesa de nitrats en aigües potables:

Organització	Concentració en NO_3^-	Concentració en $N\text{-}NO_3^-$
Organització Mundial de la Salut	50 mg/l	11 mg/l
Unió Europea	50 mg/l	11 mg/l
Estats Units d'Amèrica	45 mg/l	10 mg/l

Taula 1.2 *Relació dels nivells màxims permesos de nitrats en aigües potables*

Cal destacar que la UE, tot i establir el límit en 50 mg/l, recomana una concentració màxima de 25 mg/l de nitrats en aigües potables.

Llavors, l'Estat Espanyol ha transposat la legislació europea relativa a la qualitat de l'aigua pel consum humà, al *Real Decreto 140/2003*, segons el qual, s'estableix que la concentració màxima permesa de nitrats en aigües potables és de 50 mg/l NO_3^-, i es recomana un nivell de 25 mg/l NO_3^-.

1.6. Tecnologies per l'eliminació de nitrats en aigües potables

El ió nitrat és estable i molt soluble en l'aigua, a més de presentar un baix potencial per la coprecipitació i l'adsorció. Aquestes propietats provoquen que sigui complicat eliminar els nitrats de les aigües potables mitjançant processos convencionals de potabilització, com per exemple l'addició de coagulants i floculants amb la posterior sedimentació, o el filtratge en llits de sorra o carbó actiu.

Així doncs, per tal d'aconseguir eliminar el ió nitrat de l'aigua potable, s'han d'usar tractaments específics com: denitrificació química, intercanvi iònic, òsmosi inversa, electrodiàlisis, denitrificació catalítica i denitrificació biològica.

D'aquestes diverses tècniques, l'Agència Europea del Medi Ambient recomana tres MTD's (millors tècniques disponibles), per aconseguir eliminar els nitrats de les aigües potables:

- Intercanvi Iònic
- Òsmosi Inversa
- Electrodiàlisis

Actualment, tant els estudis d'investigació i millora, com les aplicacions a escala real, es basen en aquestes tres tècniques:

- Intercanvi Iònic (Ruppenthal, 2004 ; Reddy i Lin, 2000 ; Kapoor i Viraraghavan, 1997 ; Conlon et al, 1995 ; Woodward, 1994 ; Kartinen i Martin, 1994 ; Andrews i Harward, 1994 ; Wenli et al, 1994 ; Croll, 1993, 1991 ; Clifford i Liu, 1993 ; Rash, 1992 ; Deguin et al, 1992 ; Guter et al, 1991 ; Fletcher et al, 1991 ; Rogalla et al, 1991 ; Murphy, 1991 ; Dahab i Bogardi, 1990 ; Lockridge, 1990 ; Viraraghavan i Rao, 1990)
- Òsmosi Inversa (Ashley i Satchell, 2001 ; Reddy i Lin, 2000 ; Elyanow i Persechino, 2000 ; Passanisi i Reynolds, 2000 ; Kapoor i Viraraghavan, 1997 ; Cevaal et al, 1995 ; Filteau i Reilly, 1993 ; Rogalla et al, 1991 ; Dahab i Bogardi, 1990 ; Viraraghavan i Rao, 1990)
- Electrodiàlisis (Sanchis, 2006 ; Reahl, 2004 ; Reddy i Lin, 2000 ; Elyanow i Persechino, 2000 ; Passanisi i Reynolds, 2000 ; Takeshita i Hanada, 1999 ; Hell et al, 1998 ; Kapoor i Viraraghavan, 1997; Adham et al, 1996 ; Salem et al, 1995 ; Prato i Parent, 1993 ; Adhikary et al, 1991 ; Rogalla et al, 1991 ; Miquel i Oldani, 1991 ; Viraraghavan i Rao, 1990 ; Dahab i Bogardi, 1990)

1.7. Objectius i estructuració del projecte

Aquest projecte pretèn analitzar quina és la situació actual de la problemàtica de la contaminació per nitrats als aqüífers de Catalunya.

Per això, s'han marcat dos objectius principals:

- Realitzar un estudi dels nivells actuals de contaminació per nitrats als aqüífers a Catalunya.
- Analitzar les tres MTD's disponibles per l'eliminació de nitrats en aigües potables.

Cal destacar que per realitzar la comparació tècnica, econòmica i medi ambiental entre les diferents tecnologies per l'eliminació de nitrats, s'adoptarà com a qualitat desitjada de l'aigua tractada, la concentració de 25 ppm NO_3^- recomenada per la UE.

Llavors, per aconseguir complir els objectius marcats, el projecte s'estructurarà de la següent forma:

- Anàlisi de la situació actual de la problemàtica als aqüífers de Catalunya
- Elecció d'un cas d'estudi
- Disseny d'una planta d'eliminació de nitrats mitjançant Intercanvi Iònic
- Disseny d'una planta d'eliminació de nitrats mitjançant Òsmosi Inversa
- Disseny d'una planta d'eliminació de nitrats mitjançant Electrodiàlisis Reversible
- Comparació tècnica, econòmica i medi ambiental entre les tres tecnologies
- Pressupost del projecte
- Conclusions finals de l'estudi

2. Anàlisi de la situació actual de la problemàtica de la contaminació per nitrats als aqüífers de Catalunya

L'any 1998, la Generalitat de Catalunya va promulgar el Decret 283/1998, de 21 d'octubre, on es designaven les zones vulnerables en relació amb la contaminació de nitrats procedents de fonts agràries, en aplicació del Real Decreto 261/1996, de 16 de febrer, de transposició de la Directiva 91/676/CEE.

El Decret 283/1998 va designar, en exercici de les competències de la Generalitat de Catalunya en la matèria, sis zones vulnerables. És a dir, sis superfícies territorials on l'escolament i la infiltració provoquen, o poden provocar, la contaminació per nitrats d'orígen agrari de les aigües continentals i litorals.

L'article 4.2 del Real Decreto 261/1996, estableix la necessitat que, periòdicament, les zones vulnerables designades per les comunitats autònomes siguin examinades i, si s'escau, modificades o ampliades per tal d'adaptar-les als canvis o als factors que no s'haguessin tingut en compte en el moment de la seva designació inicial.

És per això que la Generalitat de Catalunya va decidir constituir una comissió interdepartamental, amb representants del Departament d'Agricultura, del Departament de Ramaderia i Pesca, del Departament de Medi Ambient i Habitatge, i del Departament de Salut, per tal d'estudiar i formular propostes per a la revisió de les zones vulnerables establertes inicialment el 1998.

D'acord amb les conclusions dels estudis realitzats i ateses les propostes d'aquesta comissió interdepartamental, l'any 2004 es va considerar necessari mantenir la qualificació de zones vulnerables per a les sis zones designades inicialment mitjançant el Decret 283/1998, i ampliar la relació de zones vulnerables amb la inclusió de tres noves zones, designades atenent a criteris climàtics, edàfics, agraris, i hidrogeològics.

Aquesta revisió es va portar a terme mitjançant el Decret 476/2004, de 28 de desembre, de manera que en l'actualitat les zones vulnerables en relació amb la contaminació de nitrats procedents de fonts agràries a Catalunya són:

- Àrea 1: Alt Empordà, Baix Empordà, Pla de l'Estany i Gironès

  (Els sistemes hidrogeològics afectats són: Fluviodeltaics del Fluvià i la Muga, Fluviodeltaics del Ter, Quaternaris del Daró, Travertins del Pla de l'Estany, Detrítics neògens de l'Empordà i Capçalera del Sert).

- Àrea 2: Maresme i La Selva

  (Els sistemes hidrogeològics afectats són: Fluviodeltaics de la Tordera i Neògens i quaternaris del Maresme).

- Àrea 3: Osona

  (Els sistemes hidrogeològics afectats són: Detrítics paleògens d'Osona i Calcàries paleògenes d'Osona).

- Àrea 4: Alt Camp, Baix Camp i Tarragonés

  (Els sistemes hidrogeològics afectats són: Neògens i quaternaris del Camp de Tarragona).

- Àrea 5: Alt Penedès i Baix Penedès

  (Els sistemes hidrogeològics afectats són: Sorres de Santa Oliva).

- Àrea 6: Anoia, Conca de Barberà, Garrigues, Noguera, Segarra, Urgell, Pla d'Urgell i Segrià.

  (Els sistemes hidrogeològics afectats són: Al·luvials del riu Corb, Al·luvials del riu Sió, Al·luvials de l'Urgell, Al·luvials del Segre i Calcàries oligocenes de Tàrrega).

- Àrea 7: Garrotxa

  (Els sistemes hidrogeològics afectats són: Al·luvials de la conca del Fluvià i Fluviovolcànics d'Olot).

- Àrea 8: Gironès i La Selva

  (Els sistemes hidrogeològics afectats són: Neògens i quaternaris de la Selva).

- Àrea 9: Vallès Occidental i Vallès Oriental

  (Els sistemes hidrogeològics afectats són: Neògens i quaternaris del Vallès).

2.1. Estudi sobre els nivells de contaminació per nitrats als aqüífers de les zones vulnerables de Catalunya

L'Agència Catalana de l'Aigua, mitjançant el Departament d'Inspecció i Control, disposa d'una sèrie de xarxes de control de la qualitat de l'aigua subterrània. Aquestes xarxes estan compostes per diversos conjunts de pous que abastant tot el territori, es controlen amb periodicitat preestablerta i amb el mateix objectiu diagnòstic. Les xarxes es subdivideixen en subxarxes constituïdes per conjunts de pous d'un mateix aqüífer o àrea territorial delimitada per criteris hidrogeològics, geogràfics o altres i són les unitats significatives de control.

A partir de la pàgina web de l'ACA, s'ha realitzat una consulta interactiva dels resultats obtinguts en aquestes xarxes de control de la qualitat de l'aigua subterrània durant els anys 2004 i/o 2005, centrant la cerca en els nivells de nitrats als aqüífers de les zones vulnerables.

Els resultats s'han diferenciat per cadascuna de les 9 zones vulnerables establertes al Decret 476/2004.

Seguidament, es mostra de forma gràfica el procediment utilitzat per obtenir les dades dels nivells de nitrats als aqüífers de les zones vulnerables. Per això, es detallen diferents imatges de la consulta interactiva, realitzada en la pàgina web de l'ACA:

- Primer de tot, s'ha accedit a la pàgina web de l'Agència Catalana de l'Aigua (www.gencat.net/aca).

- A continuació, s'ha entrat dins l'apartat titulat *L'aigua i el medi*, i un cop dins aquest apartat, s'ha consultat el sub-apartat *Aigües subterrànies*.

- Dins del sub-apartat *Aigües subterrànies*, s'ha escollit l'opció *Consulta interactiva.*

- L'opció *Consulta interactiva* permet recopil·lar les dades generades per l'Àrea d'Inspecció i Control de l'ACA, en relació a les xarxes de control de la qualitat de l'aigua subterrània.

- A continuació, en la figura 2.1 es mostra el format inicial que presenta l'opció *Consulta Interactiva.*

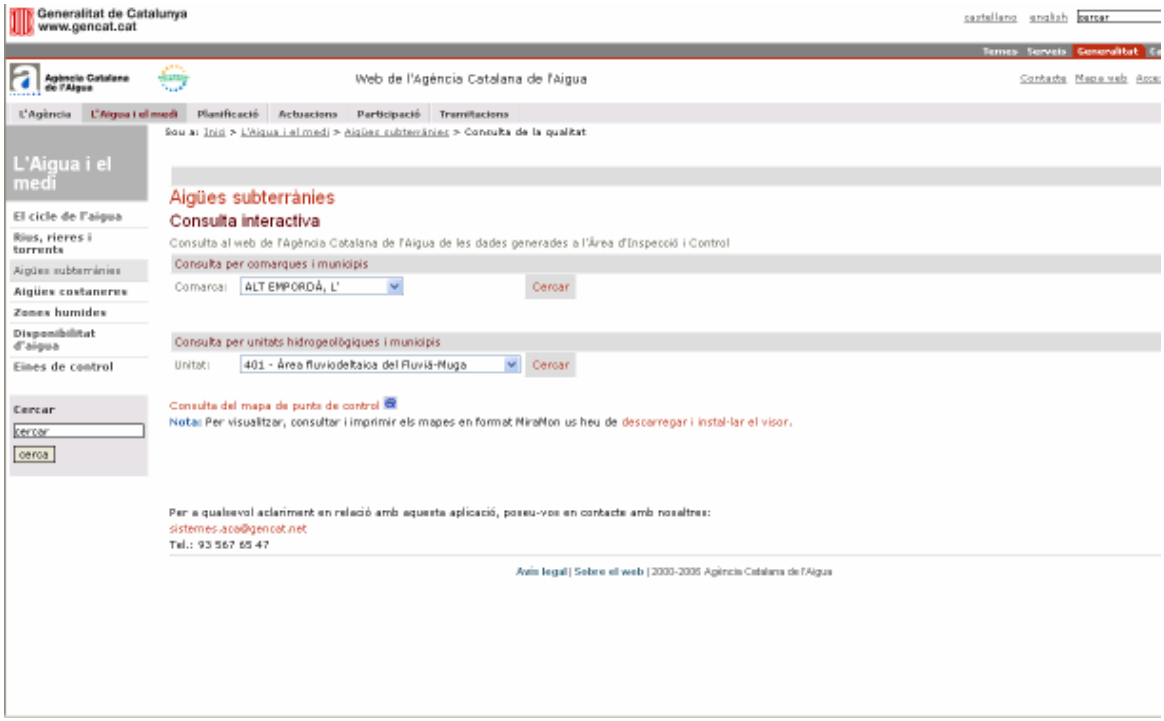


Figura 2.1 *Format inicial de la consulta interactiva de les dades generades a les xarxes de control de la qualitat de l'aigua subterrània, mitjançant la pàgina web de l'ACA*

- Com es pot veure, l'opció *Consulta interactiva* permet realitzar la búsqueda per comarques o per unitats hidrogeològiques. Per exemple, si es desitja analitzar l'àrea 2 del Decret 476/2004, i s'opta per realitzar la consulta mitjançant comarques, s'hauran d'analitzar les comarques del Maresme i La Selva. Per altra banda, si es desitja analitzar l'àrea 2 del Decret 476/2004, però s'opta per realitzar la consulta mitjançant unitats hidrogeològiques, s'hauran d'analitzar els fluviodeltaics de la Tordera i els neògens i quaternaris del Maresme.

- Un cop escollida la comarca o la unitat hidrogeològica a consultar, es prem la tecla *Cercar*, i a continuació, apareix la següent finestra de la *Consulta interactiva*, la qual es pot observar en la figura 2.2.

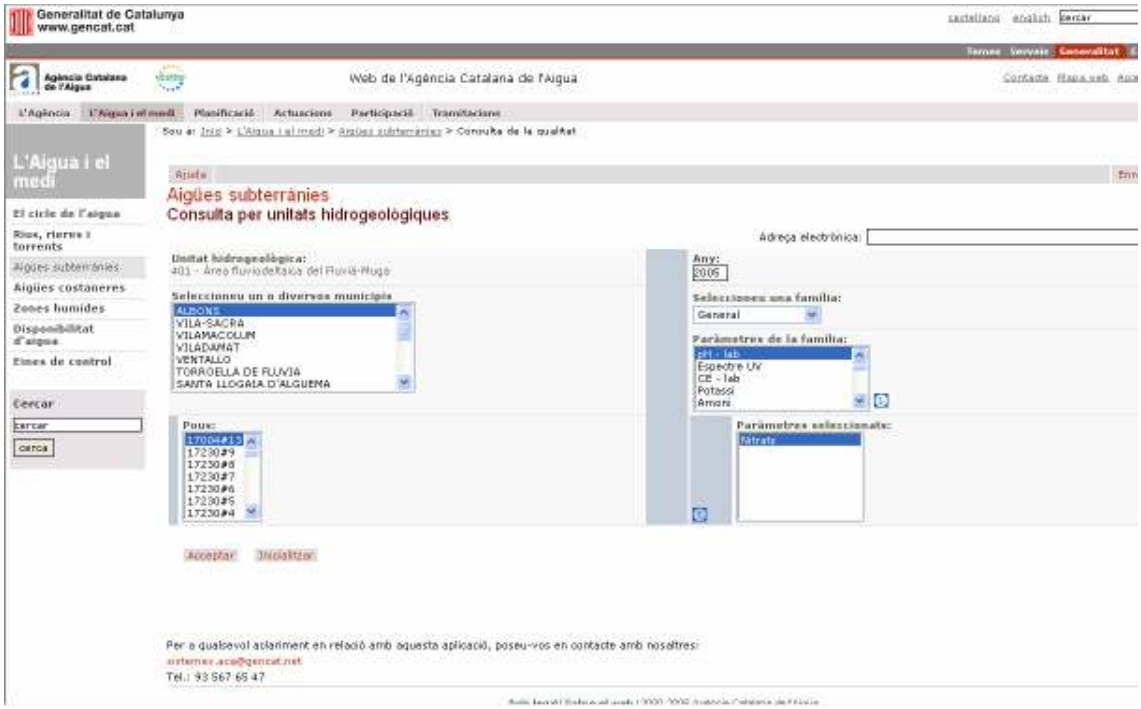


Figura 2.2 *Segon pas de la consulta interactiva de les dades generades a les xarxes de control de la qualitat de l'aigua subterrània, mitjançant la pàgina web de l'ACA*

- En el segon pas de la consulta interactiva, es poden escollir els municipis a consultar, i dins de cada municipi, els pous desitjats. En el nostre cas, es seleccionen tots els municipis i pous disponibles, per tal d'obtenir la major informació possible. A més, també s'escull l'any i els paràmetres de consulta. En el nostre cas, totes les consultes s'han realitzat pels anys 2004 i 2005, i els paràmetres requerits han estat: amoni, bicarbonats, calci, clorurs, duresa total, magnesi, nitrats, nitrits, potassi, silici, sodi, sulfats, TOC, conductivitat i ph.

- Finalment, quan s'han escollit totes les opcions desitjades, es prem la tecla *Acceptar*, i a continuació, apareix la tercera i última finestra de la *Consulta interactiva*, on es mostra el resultat de la recerca. Aquesta tercera finestra es pot observar en la figura 2.3.

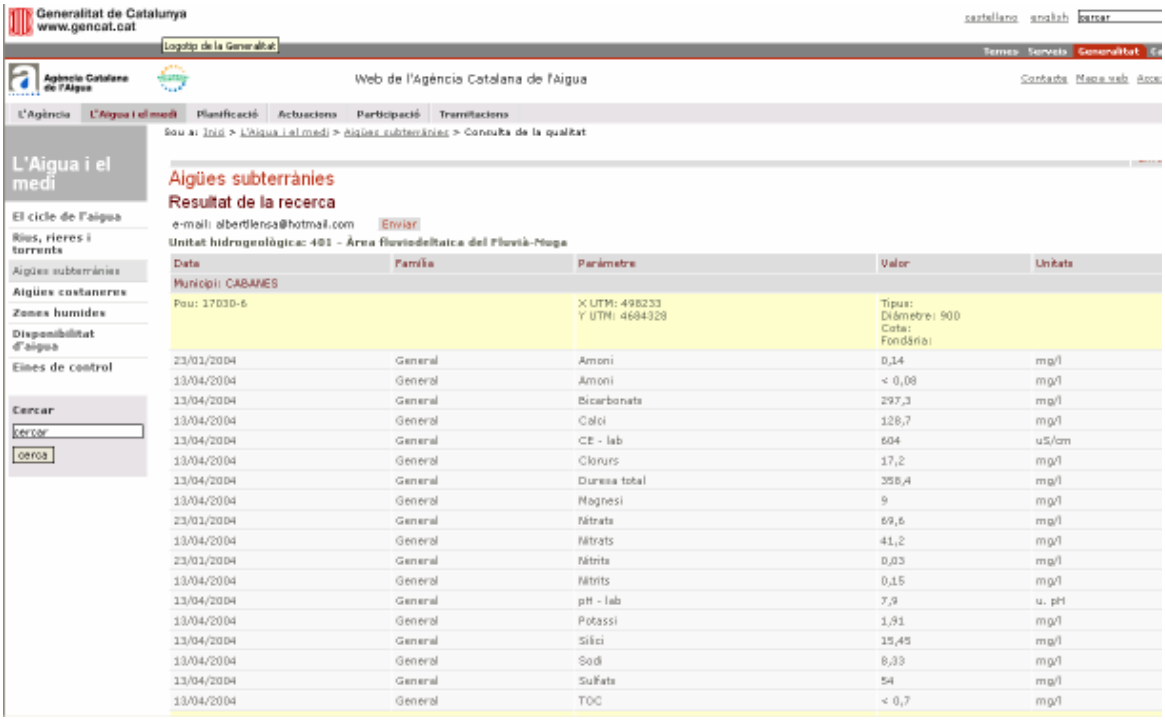


Figura 2.3 *Resultat de la consulta interactiva de les dades generades a les xarxes de control de la qualitat de l'aigua subterrània, mitjançant la pàgina web de l'ACA*

- Com es pot veure, en la finestra del *Resultat de la recerca* es mostren de forma detallada, els paràmetres requerits pels diferents pous dels diversos municipis consultats.

Un cop explicat com s'ha realitzat la consulta interactiva dels nivells de nitrats als aqüífers de les zones vulnerables, seguidament es mostraran els resultats obtinguts.

2.1.1. Àrea 1

L'àrea 1 està formada per municipis de l'Alt Empordà, el Baix Empordà, el Pla de l'Estany i el Gironés, i la seva localització es pot observar en la figura 2.4.

Figura 2.4 *Localització de l'Àrea 1 del Decret 476/2004*

En total, s'han analitzat 62 municipis, i el resultat detallat per cadascun d'ells es pot comprovar a continuació, en la taula 2.1.

Municipi	Concentració NO_3^- (mg/l)
Gualta	1,50
Sant Pere Pescador	1,60
Castell - Platja d'Aro	3,30
Sant Martí Vell	3,60
L'Escala	4,10
Castelló d'Empúries	6,00
La Tallada d'Empordà	6,70
Vila-sacra	7,30
Celrà	7,65
Ventalló	7,73
Fontanilles	8,20
Pals	8,60
Torroella de Montgrí	10,45
Santa Cristina d'Aro	11,75
Albons	12,23
Cabanelles	15,33
Calonge	17,00
Sant Miquel de Fluvià	17,10
Palau de Santa Eulàlia	19,30
Colomers	20,10
Torroella de Fluvià	20,40
Siurana	21,10
Bellcaire d'Empordà	21,15
Serra de Daró	24,00
Verges	25,10
Vilademuls	26,11
Ultramort	28,30
Peralada	31,80
Vilamalla	34,30
Vilaür	35,50
Sant Joan de Mollet	38,60
Fontcoberta	39,97
Palamòs	44,50
Viladesens	46,32
Sant Jordi Desvalls	50,90
Corçà	53,20
Sant Julià de Ramis	53,20
Flaçà	55,60
La Pera	55,90
La Bisbal d'Empordà	56,65
Bàscara	59,35
Foixà	60,25
Bordils	61,77
Saus	62,53
Vilafant	64,00
Juià	65,10
Parlavà	67,40
Ordis	70,50
Banyoles	72,75

Fortià	75,23
Navata	80,00
Pontòs	82,75
Cabanes	83,25
Cornellà del Terri	84,40
Palol de Revardit	95,30
Figueres	101,30
El Far d'Empordà	102,95
Viladamat	103,85
Jafre	119,97
Borrassà	121,35
Vilamacolum	183,60
Riumors	195,80

Taula 2.1 *Nivells de nitrats als municipis de l'Àrea 1 del Decret 476/2004*

Realitzant una anàlisi estadística dels resultats obtinguts, aconseguim les següents dades:

	Total	**Percentatge**
Municipis analitzats:	62	
Municipis no afectats:	34	55%
Municipis afectats:	28	45%
Casos correctes (< 25 mg/l):	24	39%
Casos perillosos (25 mg/l > x < 50 mg/l):	10	16%
Afectats lleus (50 mg/l > x < 75 mg/l):	15	24%
Afectats greus (75 mg/l > x < 100 mg/l):	6	10%
Afectats extrems (> 100 mg/l):	7	11%
Mitjana:	47,83 mg/l	

Taula 2.2 *Anàlisi estadística del nivell de nitrats a l'Àrea 1 del Decret 476/2004*

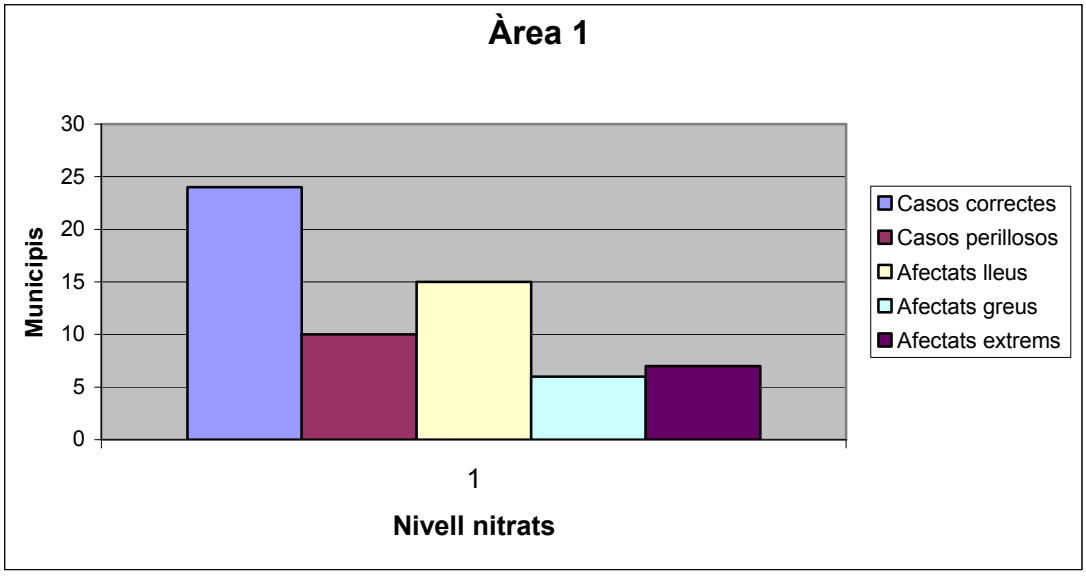


Figura 2.5 *Representació gràfica dels nivells de nitrats a l'Àrea 1 del Decret 476/2004*

2.1.2. Àrea 2

L'àrea 2 està formada per municipis del Maresme i La Selva, i la seva localització es pot observar en la figura 2.6.

Figura 2.6 *Localització de l'Àrea 2 del Decret 476/2004*

En total, s'han analitzat 30 municipis, i el resultat detallat per cadascun d'ells es pot comprovar a continuació, en la taula 2.3.

Municipi	Concentració NO_3^- (ppm)
Tordera	11,81
Sant Iscle de Vallalta	16,27
Blanes	21,62
Orrius	27,50
Palafolls	27,50
Caldes d'Estrac	35,10
Teià	40,00
Dosrius	42,87
Sant Pol de Mar	47,20
Sant Vicenç de Montalt	52,10
Sant Cebrià de Vallalta	53,85
Arenys de Munt	68,72
Argentona	77,23
Premià de Dalt	79,20
Alella	81,12
Tiana	85,00
Arenys de Mar	95,12
Cabrils	100,47
Santa Susanna	104,87
Vilassar de Dalt	107,90
Canet de Mar	117,03
Sant Andreu de Llavaneres	123,99
Pineda de Mar	124,35
Malgrat de Mar	126,45
Mataró	136,62
Calella	143,70
Premià de Mar	158,45
El Masnou	191,36
Vilassar de Mar	339,53
Cabrera de Mar	405,62

Taula 2.3 *Nivells de nitrats als municipis de l'Àrea 2 del Decret 476/2004*

Realitzant una anàlisi estadística dels resultats obtinguts, aconseguim les següents dades:

	Total	Percentatge
Municipis analitzats:	30	
Municipis no afectats:	9	30%
Municipis afectats:	21	70%
Casos correctes (< 25 mg/l):	3	10%
Casos perillosos (25 mg/l > x < 50 mg/l):	6	20%
Afectats lleus (50 mg/l > x < 75 mg/l):	3	10%
Afectats greus (75 mg/l > x < 100 mg/l):	5	17%
Afectats extrems (> 100 mg/l):	13	43%
Mitjana:	101,42 mg/l	

Taula 2.4 *Anàlisi estadística del nivell de nitrats a l'Àrea 2 del Decret 476/2004*

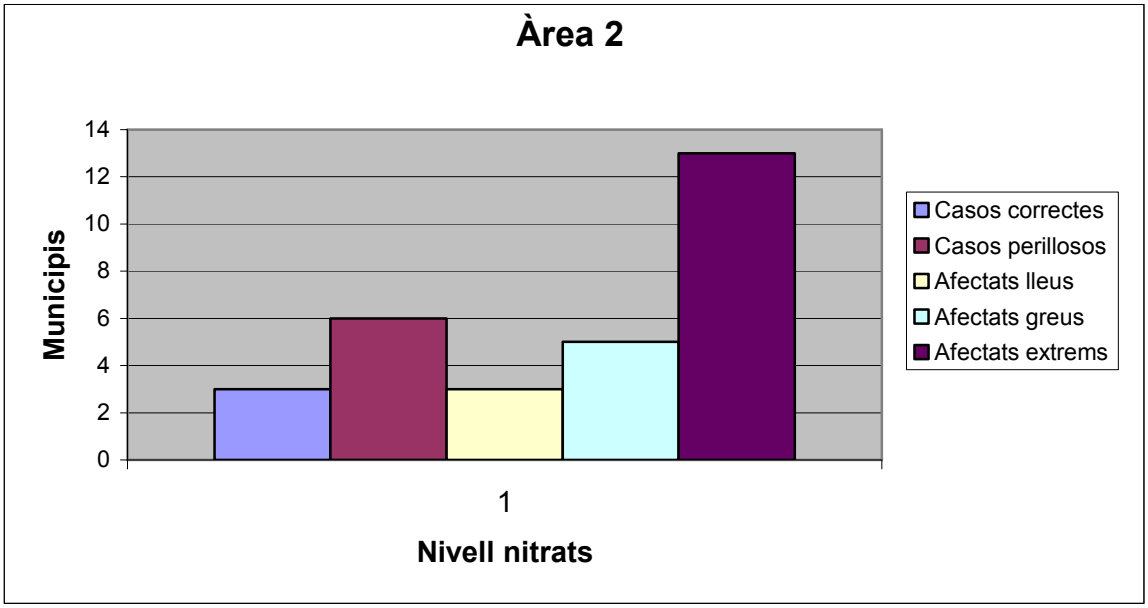


Figura 2.7 *Representació gràfica dels nivells de nitrats a l'Àrea 2 del Decret 476/2004*

2.1.3. Àrea 3

L'àrea 3 està formada per municipis d'Osona, i la seva localització es pot observar en la figura 2.8.

Figura 2.8 *Localització de l'Àrea 3 del Decret 476/2004*

En total, s'han analitzat 29 municipis, i el resultat detallat per cadascun d'ells es pot comprovar a continuació, en la taula 2.5.

Municipi	Concentració NO_3^- (ppm)
Sobremunt	0,40
Tavertet	0,50
Sant Hipòlit de Voltregà	1,90
Sant Vicenç de Torelló	2,30
Tona	2,75
Sant Bartomeu del Grau	4,60
Oris	5,90
Santa Maria de Corcó	12,90
Muntanyola	18,60
Sant Julià de Vilatorta	19,80
Santa Eulàlia de Riuprimer	21,35
Sant Boi de Lluçanès	35,05
Folgueroles	45,00
Tavernoles	46,50
Perafita	48,03
Les Masies de Roda	49,03
Taradell	51,07
Les Masies de Voltregà	55,90
Centelles	58,10
Torelló	59,57
Balenyà	92,80
Seva	104,40
Santa Cecília de Voltregà	121,00
Malla	135,25
Vic	149,70
Sant Pere de Torelló	156,40
Roda de Ter	185,20
Gurb	187,52
Manlleu	236,00

Taula 2.5 *Nivells de nitrats als municipis de l'Àrea 3 del Decret 476/2004*

Realitzant una anàlisi estadística dels resultats obtinguts, aconseguim les següents dades:

	Total	Percentatge
Municipis analitzats:	29	
Municipis no afectats:	16	55%
Municipis afectats:	13	45%
Casos correctes (< 25 mg/l):	11	38%
Casos perillosos (25 mg/l > x < 50 mg/l):	5	17%
Afectats lleus (50 mg/l > x < 75 mg/l):	4	14%
Afectats greus (75 mg/l > x < 100 mg/l):	1	3%
Afectats extrems (> 100 mg/l):	8	28%
Mitjana:	65,78 mg/l	

Taula 2.6 *Anàlisi estadística del nivell de nitrats a l'Àrea 3 del Decret 476/2004*

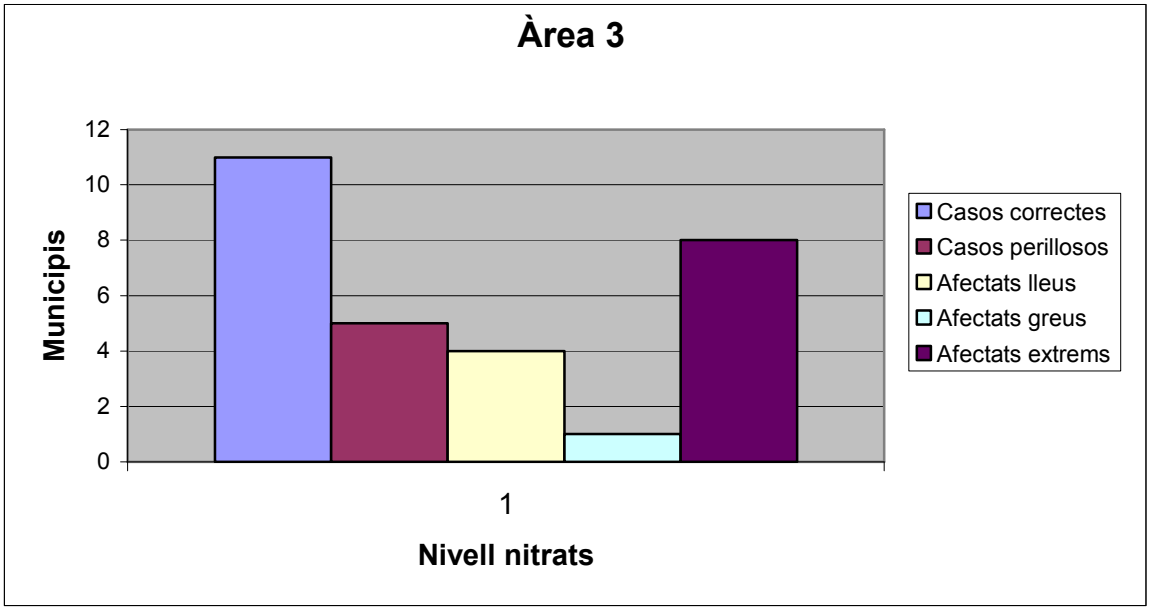


Figura 2.9 *Representació gràfica dels nivells de nitrats a l'Àrea 3 del Decret 476/2004*

2.1.4. Àrea 4

L'àrea 4 està formada per municipis de l'Alt Camp, el Baix Camp i el Tarragonès, i la seva localització es pot observar en la figura 2.10.

Figura 2.10 *Localització de l'Àrea 4 del Decret 476/2004*

En total, s'han analitzat 42 municipis, i el resultat detallat per cadascun d'ells es pot comprovar a continuació, en la taula 2.7.

Municipi	Concentració NO_3^- (ppm)
Rodonya	5,50
Montferri	10,90
El Catllar	13,55
Renau	16,40
Sant Jaume dels Domenys	16,70
Altafulla	19,45
Maspujols	19,50
Roda de Barà	21,15
La Pobla de Montornés	22,75
Alcover	23,00
Perafort	27,00
Alio	27,10
Valls	27,55
Tarragona	27,90
La Masó	31,10
Nulles	33,73
La Riera de Gaia	34,10
Torredembarra	36,80
La Secuita	39,03
Montbrió del Camp	42,05
Vilallonga del Camp	42,85
Vinyols i els Arcs	47,20
Vilabella	51,13
Les Borges del Camp	54,90
Brafim	54,08
Reus	58,07
Puigpelat	60,00
Els Garidells	61,45
Mont-Roig del Camp	62,78
Botarell	66,36
Cambrils	67,90
La Pobla de Mafumet	67,90
Vallmoll	67,98
Creixell	69,00
La Selva del Camp	71,00
Vilanova d'Escornalbou	78,10
El Morell	79,10
El Rourell	81,60
Riudoms	89,53
El Milà	92,60
Constantí	116,35
Vila-rodona	138,30

Taula 2.7 *Nivells de nitrats als municipis de l'Àrea 4 del Decret 476/2004*

Realitzant una anàlisi estadística dels resultats obtinguts, aconseguim les següents dades:

	Total	Percentatge
Municipis analitzats:	42	
Municipis no afectats:	22	52%
Municipis afectats:	20	48%
Casos correctes (< 25 mg/l):	10	24%
Casos perillosos (25 mg/l > x < 50 mg/l):	12	28%
Afectats lleus (50 mg/l > x < 75 mg/l):	13	31%
Afectats greus (75 mg/l > x < 100 mg/l):	5	12%
Afectats extrems (> 100 mg/l):	2	5%
Mitjana:	49,37 mg/l	

Taula 2.8 *Anàlisi estadística del nivell de nitrats a l'Àrea 4 del Decret 476/2004*

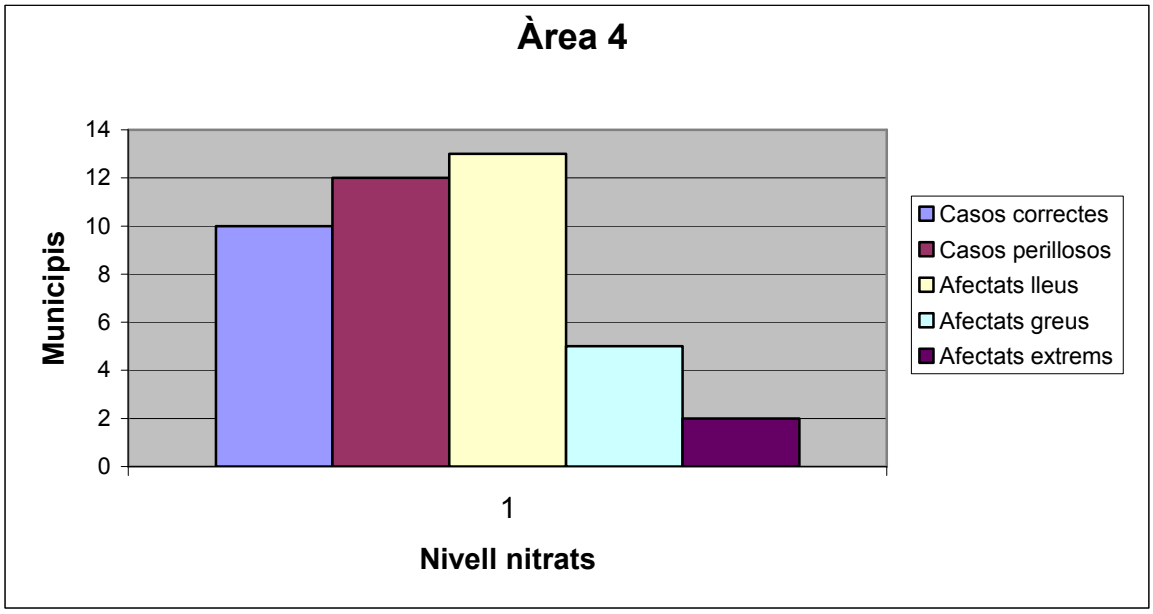


Figura 2.11 *Representació gràfica dels nivells de nitrats a l'Àrea 4 del Decret 476/2004*

2.1.5. Àrea 5

L'àrea 5 està formada per municipis de l'Alt Penedès i el Baix Penedès, i la seva localització es pot observar en la figura 2.12.

Figura 2.12 *Localització de l'Àrea 5 del Decret 476/2004*

En total, s'han analitzat 16 municipis, i el resultat detallat per cadascun d'ells es pot comprovar a continuació, en la taula 2.9.

Municipi	Concentració NO_3^- (ppm)
L'Arboç	8,10
Castellví de Rosanes	11,70
Llorenç del Penedès	12,57
Sant Llorenç d'Hortons	14,50
Bellvei	19,20
Castellet i La Gornal	24,90
Torrelavit	31,55
Vilafranca del Penedès	32,35
Sant Pere de Riudebitlles	33,00
Banyeres del Penedès	41,04
Albinyana	45,40
Sant Jaume dels Domenys	45,80
Santa Oliva	49,60
Santa Margarida i els Monjos	64,20
La Bisbal del Penedès	82,17
El Vendrell	107,70

Taula 2.9 *Nivells de nitrats als municipis de l'Àrea 5 del Decret 476/2004*

Realitzant una anàlisi estadística dels resultats obtinguts, aconseguim les següents dades:

	Total	Percentatge
Municipis analitzats:	16	
Municipis no afectats:	13	81%
Municipis afectats:	3	19%
Casos correctes (< 25 mg/l):	6	37%
Casos perillosos (25 mg/l > x < 50 mg/l):	7	44%
Afectats lleus (50 mg/l > x < 75 mg/l):	1	6%
Afectats greus (75 mg/l > x < 100 mg/l):	1	6%
Afectats extrems (> 100 mg/l):	1	6%
Mitjana:	38,99 mg/l	

Taula 2.10 *Anàlisi estadística del nivell de nitrats a l'Àrea 5 del Decret 476/2004*

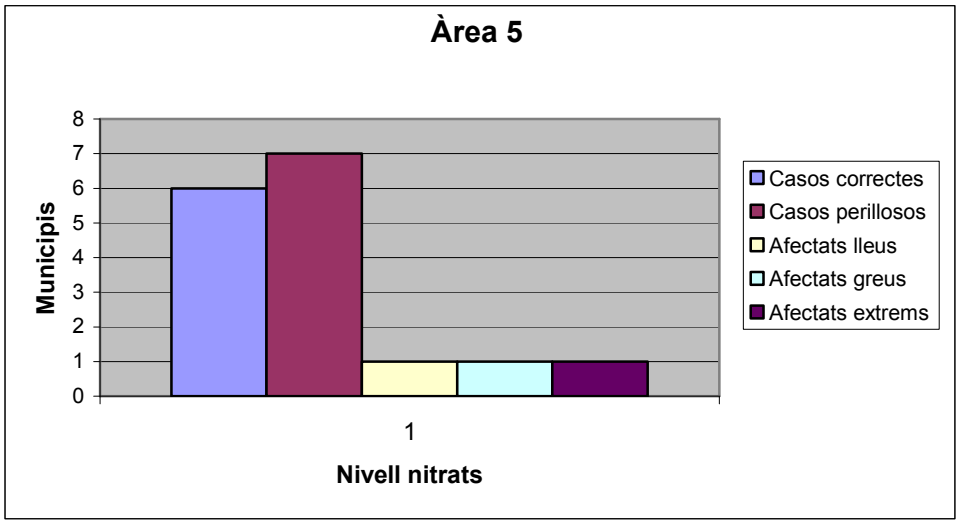


Figura 2.13 *Representació gràfica dels nivells de nitrats a l'Àrea 5 del Decret 476/2004*

2.1.6. Àrea 6

L'àrea 6 està formada per municipis de l'Anoia, la Conca de Barberà, les Garrigues, la Noguera, la Segarra, l'Urgell, el Pla d'Urgell i el Segrià, i la seva localització es pot observar en la figura 2.14.

Figura 2.14 *Localització de l'Àrea 6 del Decret 476/2004*

En total, s'han analitzat 113 municipis, i el resultat detallat per cadascun d'ells es pot comprovar a continuació, en la taula 2.11.

Municipi	Concentració NO_3^- (ppm)
Aspa	0,30
El Cògul	0,30
Sarroca de Lleida	0,30
Torrelles de Foix	0,40
El Vilosell	1,00
Sidamon	2,60
Montblanc	2,85
Juncosa	3,40
La Pobla de Cèrvoles	3,40
Cubells	4,70
Pontons	5,55
Sant Quintí de Mediona	6,40
La Pobla de Claramunt	7,40
Cabrera d'Igualada	9,20
Preixana	9,30
La Granja d'Escarp	10,00
Montornés de Segarra	13,00
Sudanell	13,30
Carme	13,40
Vespella	13,80
Vilanova de la Barca	13,90
La Torre de Claramunt	14,10
Barberà de la Conca	14,90
Bellcaire d'Urgell	15,80
La Granadella	16,40
Cervià de les Garrigues	16,90
La Portella	18,20
Ciutadilla	20,10
Guimera	21,70
Torrelameu	22,70
Sant Guim de Freixenet	22,90
Sant Martí de Riucorb	23,52
Bell-lloc d'Urgell	23,70
L'Espluga de Francolí	25,80
Ribera d'Ondara	26,43
Termens	27,87
Montoliu de Segarra	28,40
Castelló de Farfanya	28,60
Torrebesses	28,70
Solivella	30,70
Calonge de Segarra	31,60
Tornabous	32,08
Biosca	32,60
Talavera	33,28
Sant Guim de la Plana	33,85
L'Albí	35,10
Oliola	39,60
Barbens	40,50
Maials	40,70

Bovera	41,60
Granyena de les Garrigues	43,60
Fondarella	43,97
Guissona	43,98
L'Espluga Calba	44,93
Blancafort	45,40
Nalec	49,30
Rocafort de Queralt	50,60
Granyanella	51,60
Bellaguarda	51,80
Lleida	52,40
Vilanova de l'Aguda	52,70
Granyena de Segarra	52,90
La Fuliola	53,20
Agramunt	55,18
Preixens	56,30
El Soleràs	56,50
Els Omells de Na Gaia	61,10
Massoteres	61,35
Maldà	61,55
Bellvis	62,45
Vallbona de les Monges	63,12
El Poal	63,50
Els Alamus	63,56
Penelles	68,60
Osso de Sió	69,26
Llardecans	69,50
Almacelles	71,40
Sant Ramon	71,53
Els Torms	72,60
Artesa de Segre	72,80
Puigverd d'Agramunt	72,80
Les Borges Blanques	73,50
Mediona	74,20
Torregrossa	75,50
Golmes	75,90
Vilasana	76,60
Tàrrega	78,78
Castellnou de Seana	79,60
Torrefeta i Florejacs	81,07
Arbeca	82,40
Vilanova de Bellpuig	83,13
Ivars d'Urgell	83,50
Estaràs	90,32
Vinaixa	90,90
Castellsera	92,10
Albesa	99,00
Les Oluges	103,73
El Palau d'Anglesola	104,55
Belianes	105,05

Els Plans de Sió	105,66
Bellpuig	107,88
Mollerussa	114,00
La Sentiu de Sió	124,00
Cervera	125,58
Verdú	125,70
Castelldans	144,55
Tarroja de Segarra	151,90
Miralcamp	170,80
Anglesola	214,10
Almatret	254,00
Alcano	259,00
Algerri	279,80
Balaguer	347,00

Taula 2.11 *Nivells de nitrats als municipis de l'Àrea 6 del Decret 476/2004*

Realitzant una anàlisi estadística dels resultats obtinguts, aconseguim les següents dades:

	Total	**Percentatge**
Municipis analitzats:	113	
Municipis no afectats:	56	49%
Municipis afectats:	57	51%
Casos correctes (< 25 mg/l):	33	29%
Casos perillosos (25 mg/l > x < 50 mg/l):	23	20%
Afectats lleus (50 mg/l > x < 75 mg/l):	27	24%
Afectats greus (75 mg/l > x < 100 mg/l):	13	12%
Afectats extrems (> 100 mg/l):	17	15%
Mitjana:	60,23 mg/l	

Taula 2.12 *Anàlisi estadística del nivell de nitrats a l'Àrea 6 del Decret 476/2004*

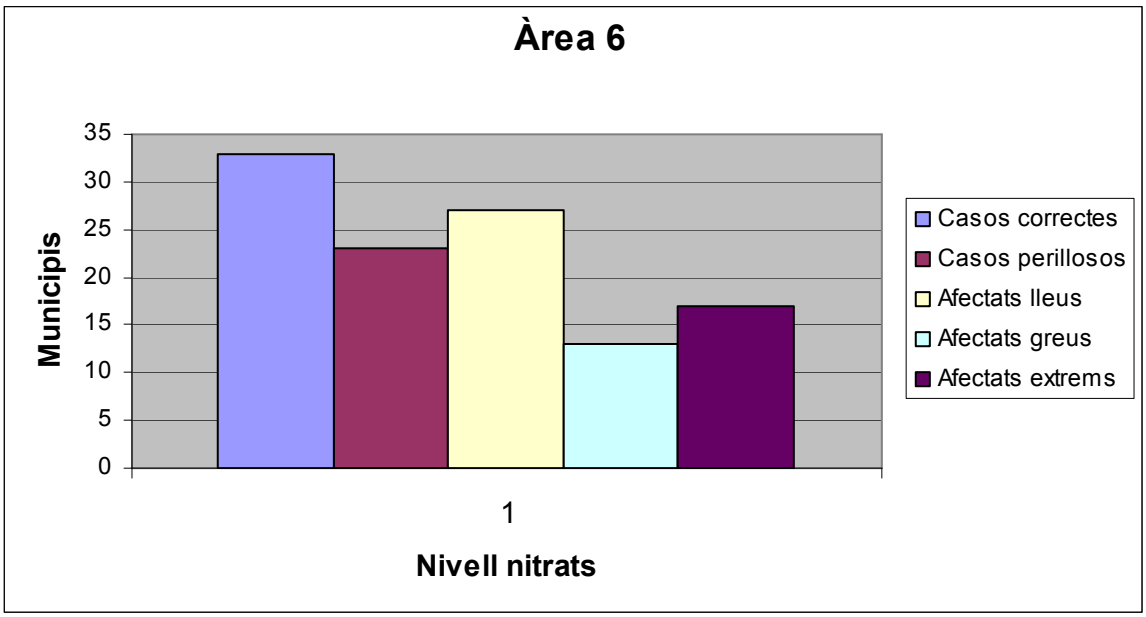


Figura 2.15 *Representació gràfica dels nivells de nitrats a l'Àrea 6 del Decret 476/2004*

2.1.7. Àrea 7

L'àrea 7 està formada per municipis de la Garrotxa, i la seva localització es pot observar en la figura 2.16.

Figura 2.16 *Localització de l'Àrea 7 del Decret 476/2004*

En total, s'han analitzat 6 municipis, i el resultat detallat per cadascun d'ells es pot comprovar a continuació, en la taula 2.13.

Municipi	Concentració NO_3^- (ppm)
Olot	23,97
Castellfollit de la Roca	25,70
Santa Pau	26,67
Les Preses	30,10
Sant Joan les Fonts	33,45
La Vall de Bianya	40,90

Taula 2.13 *Nivells de nitrats als municipis de l'Àrea 7 del Decret 476/2004*

Realitzant una anàlisi estadística dels resultats obtinguts, aconseguim les següents dades:

	Total	Percentatge
Municipis analitzats:	6	
Municipis no afectats:	6	100%
Municipis afectats:	0	0%
Casos correctes (< 25 mg/l):	1	17%
Casos perillosos (25 mg/l > x < 50 mg/l):	5	83%
Afectats lleus (50 mg/l > x < 75 mg/l):	0	0%
Afectats greus (75 mg/l > x < 100 mg/l):	0	0%
Afectats extrems (> 100 mg/l):	0	0%
Mitjana:	30,13 mg/l	

Taula 2.14 *Anàlisi estadística del nivell de nitrats a l'Àrea 7 del Decret 476/2004*

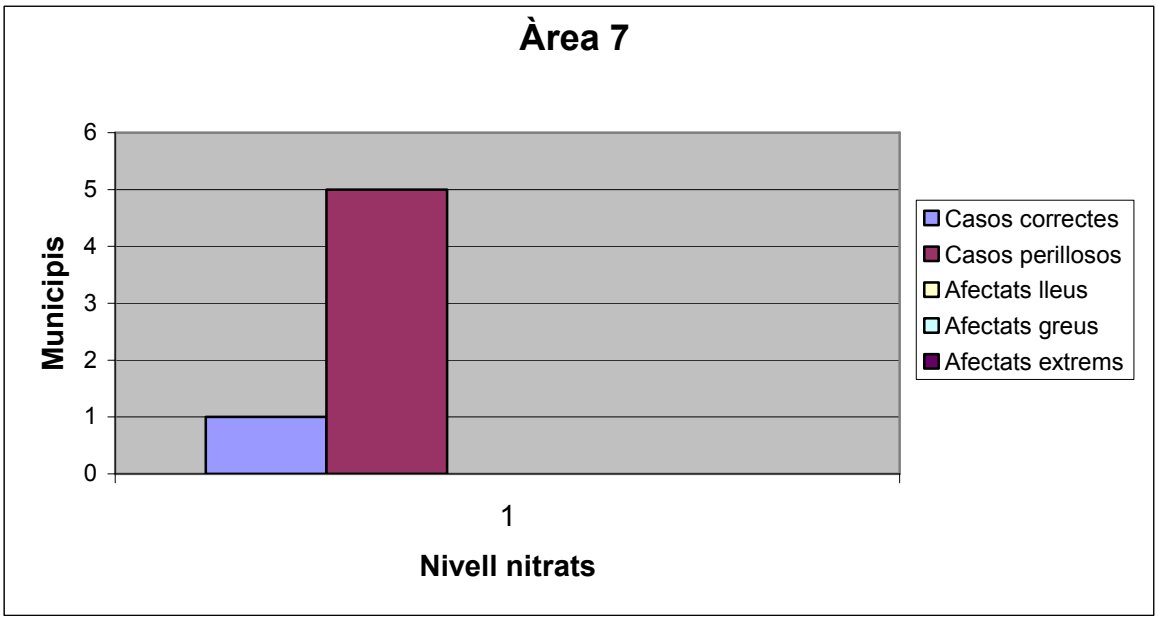


Figura 2.17 *Representació gràfica dels nivells de nitrats a l'Àrea 7 del Decret 476/2004*

2.1.8. Àrea 8

L'àrea 8 està formada per municipis del Gironès i La Selva, i la seva localització es pot observar en la figura 2.18.

Figura 2.18 *Localització de l'Àrea 8 del Decret 476/2004*

En total, s'han analitzat 15 municipis, i el resultat detallat per cadascun d'ells es pot comprovar a continuació, en la taula 2.15.

Municipi	Concentració NO_3^- (ppm)
Santa Coloma de Farners	0,55
Sant Gregori	1,15
Riudarenes	1,20
Fogars de la Selva	1,30
Maçanet de la Selva	2,60
Sant Hilari Sacalm	4,50
Quart	5,30
Massanes	9,00
Bonmatí	11,75
Sils	24,85
Caldes de Malavella	26,70
Bescanó	35,20
Arbúcies	35,70
Celrà	107,40
Vilobí d'Onyar	125,65

Taula 2.15 *Nivells de nitrats als municipis de l'Àrea 8 del Decret 476/2004*

Realitzant una anàlisi estadística dels resultats obtinguts, aconseguim les següents dades:

	Total	Percentatge
Municipis analitzats:	15	
Municipis no afectats:	13	87%
Municipis afectats:	2	13%
Casos correctes (< 25 mg/l):	10	67%
Casos perillosos (25 mg/l > x < 50 mg/l):	3	20%
Afectats lleus (50 mg/l > x < 75 mg/l):	0	
Afectats greus (75 mg/l > x < 100 mg/l):	0	
Afectats extrems (> 100 mg/l):	2	13%
Mitjana:	26,19 mg/l	

Taula 2.16 *Anàlisi estadística del nivell de nitrats a l'Àrea 8 del Decret 476/2004*

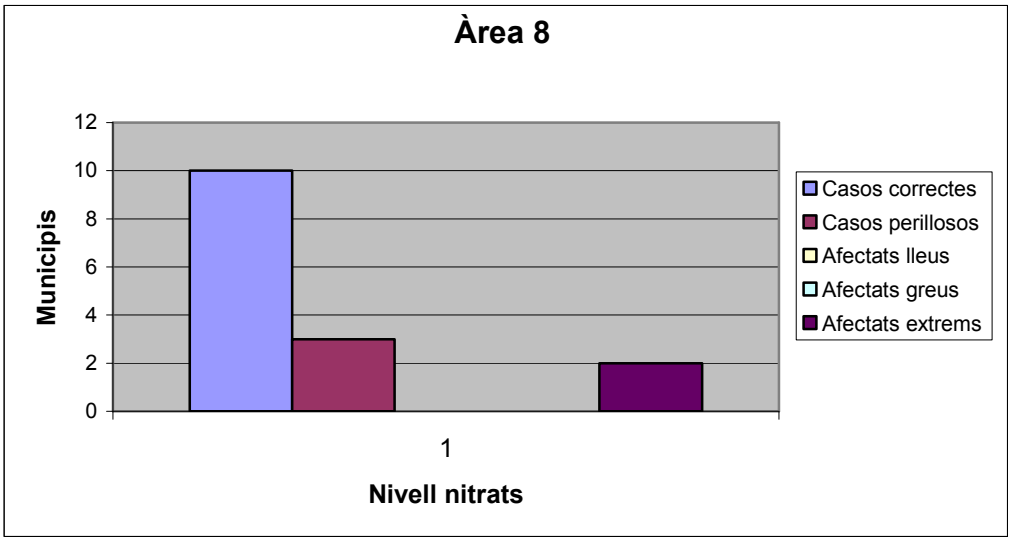


Figura 2.19 *Representació gràfica dels nivells de nitrats a l'Àrea 8 del Decret 476/2004*

2.1.9. Àrea 9

L'àrea 9 està formada per municipis del Vallés Occidental i el Vallés Oriental, i la seva localització es pot observar en la figura 2.20.

Figura 2.20 *Localització de l'Àrea 9 del Decret 476/2004*

En total, s'han analitzat 27 municipis, i el resultat detallat per cadascun d'ells es pot comprovar a continuació, en la taula 2.17.

Municipi	Concentració NO_3^- (ppm)
Sant Feliu de Buixalleu	1,20
Sant Celoni	1,50
Castellbisbal	1,95
Gualba	6,00
Hostalric	6,50
Castellar del Vallès	8,90
La Roca del Vallès	9,40
Santa Maria de Palautordera	9,40
Santa Perpetua de Mogoda	15,00
Mollet del Vallès	15,88
Sabadell	17,55
La Garriga	18,65
La Llagosta	22,55
Llinars del Vallès	24,80
Martorelles	30,60
Montornés del Vallès	32,45
Aiguafreda	39,90
Lliçà d'Amunt	39,90
Sant Fost de Campsentelles	48,60
Lliçà de Vall	49,00
Montmeló	50,60
Granollers	64,90
Les Franqueses del Vallès	78,80
Caldes de Montbui	92,85
Vilanova del Vallès	96,70
Canovelles	155,00
Bigues i Riells	162,60

Taula 2.17 *Nivells de nitrats als municipis de l'Àrea 9 del Decret 476/2004*

Realitzant una anàlisi estadística dels resultats obtinguts, aconseguim les següents dades:

	Total	Percentatge
Municipis analitzats:	27	
Municipis no afectats:	20	74%
Municipis afectats:	7	26%
Casos correctes (< 25 mg/l):	14	52%
Casos perillosos (25 mg/l > x < 50 mg/l):	6	22%
Afectats lleus (50 mg/l > x < 75 mg/l):	2	7%
Afectats greus (75 mg/l > x < 100 mg/l):	3	12%
Afectats extrems (> 100 mg/l):	2	7%
Mitjana:	40,78 mg/l	

Taula 2.18 *Anàlisi estadística del nivell de nitrats a l'Àrea 9 del Decret 476/2004*

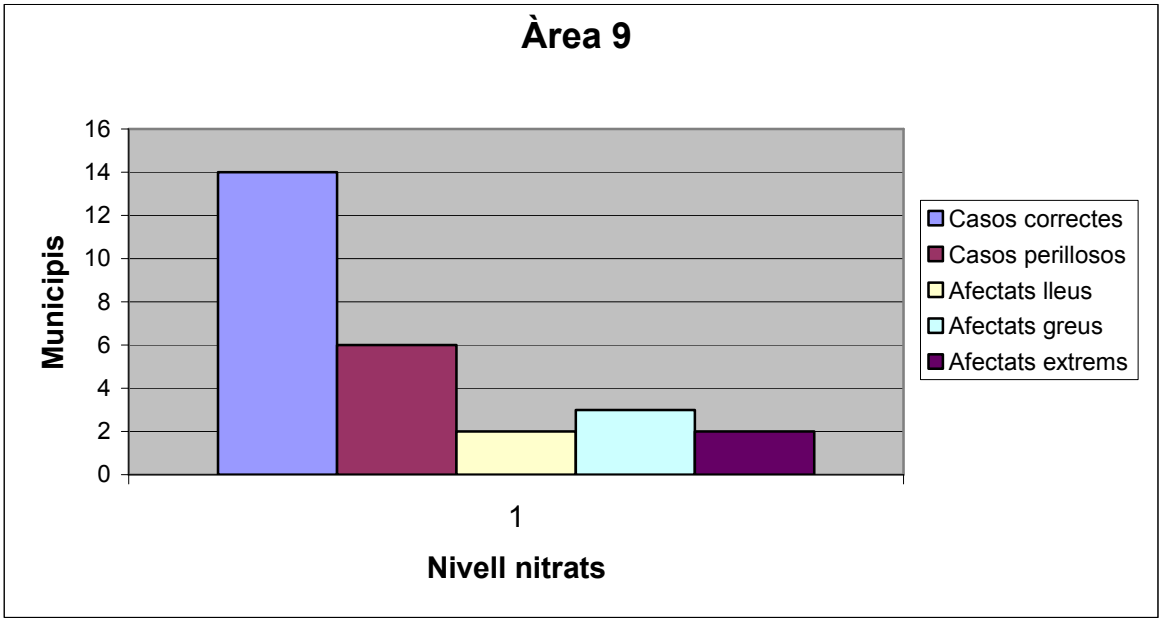


Figura 2.21 *Representació gràfica dels nivells de nitrats a l'Àrea 9 del Decret 476/2004*

2.2. Classificació de les zones vulnerables de Catalunya segons el seu nivell d'afectació

A partir de l'estudi estadístic realitzat al punt anterior, s'ha desenvolupat una classificació de les 9 zones vulnerables a la contaminació per nitrats establertes al Decret 476/2004, segons el nivell d'afectació que presenta cadascuna d'elles.

2.2.1. Zones poc afectades

En aquest primer nivell, s'han situat aquelles àrees que presenten un nivell de contaminació baix. La mitjana de les diverses àrees es situa per sota el límit dels 50 mg/l NO_3^-, i en tots els casos, el percentatge de municipis afectats no arriba a una tercera part del total.

Àrea	Mitjana NO_3^-	Municipis afectats
Àrea 7	30,13 mg/l	0 %
Àrea 8	26,19 mg/l	13 %
Àrea 5	38,99 mg/l	19 %
Àrea 9	40,78 mg/l	26 %

Taula 2.19 *Relació de les zones vulnerables del Decret 476/2004 poc afectades*

2.2.2. Zones força afectades

En aquest segon nivell, s'han situat aquelles àrees que presenten un nivell de contaminació intermig. La mitjana de les diverses àrees es situa al llindar del límit dels 50 mg/l NO_3^-, i la meitat dels municipis estan afectats.

Àrea	Mitjana NO_3^-	Municipis afectats
Àrea 1	47,83 mg/l	45 %
Àrea 4	49,37 mg/l	48 %

Taula 2.20 *Relació de les zones vulnerables del Decret 476/2004 força afectades*

2.2.3. Zones molt afectades

En aquest tercer nivell, s'han situat aquelles àrees que presenten un nivell de contaminació elevat. El percentatge de municipis afectats es continua situant al voltant del 50%, però la mitjana de contaminació per nitrats supera clarament el límit dels 50 mg/l NO_3^-.

Àrea	Mitjana NO_3^-	Municipis afectats
Àrea 6	60,23 mg/l	51 %
Àrea 3	65,78 mg/l	45 %

Taula 2.21 *Relació de les zones vulnerables del Decret 476/2004 molt afectades*

2.2.4. Zona d'afectació extrema

En aquest quart nivell, s'ha situat l'àrea 2, la qual presenta un nivell de contaminació extrem, amb un percentatge de municipis afectats que supera clarament el 50%, i amb una mitjana de contaminació per nitrats duplica el límit dels 50 mg/l NO_3^-.

Àrea	Mitjana NO_3^-	Municipis afectats
Àrea 2	101,42 mg/l	70 %

Taula 2.22 *Relació de les zones vulnerables del Decret 476/2004 amb afectació extrema*

2.3. Elecció d'un cas d'estudi

Tal i com s'ha pogut observar al punt anterior, de les diverses zones vulnerables a la contaminació per nitrats a Catalunya, establertes al Decret 476/2004, la zona més afectada és l'àrea 2, la qual comprèn municipis del Maresme i la Selva.

Llavors, s'ha decidit que el cas d'estudi per dissenyar les diverses plantes d'eliminació de nitrats, sigui un municipi d'aquesta àrea amb un nivell d'afectació extrem a la contaminació per nitrats.

Per escollir el cas d'estudi, s'han pres els 4 municipis amb una concentració de nitrats més propera a la mitjana de tota la zona (101,42 mg/l NO_3^-), i s'ha analitzat l'evolució històrica del nivell de nitrats als aqüífers d'aquests 4 municipis escollits.

Els pobles analitzats són Arenys de Mar, Cabrils, Santa Susanna i Vilassar de Dalt. Les mitjanes anuals dels quatre municipis es poden consultar a la taula 2.23, mentres que la seva evolució històrica es pot observar a la figura 2.22.

Municipi	Arenys de Mar	Cabrils	Santa Susanna	Vilassar de Dalt
Any 2005	95,13	100,48	104,88	107,90
Any 2004	89,03	68,95	99,95	130,30
Any 2003	85,98	28,38	76,84	116,10
Any 2002	96,24	28,00	75,82	124,63
Any 2001	91,33	19,66	39,50	88,00
Mitjana	91,54	49,09	79,40	113,39

Taula 2.23 *Mitjanes anuals del nivell de nitrats als aqüífers dels quatre municipis analitzats*

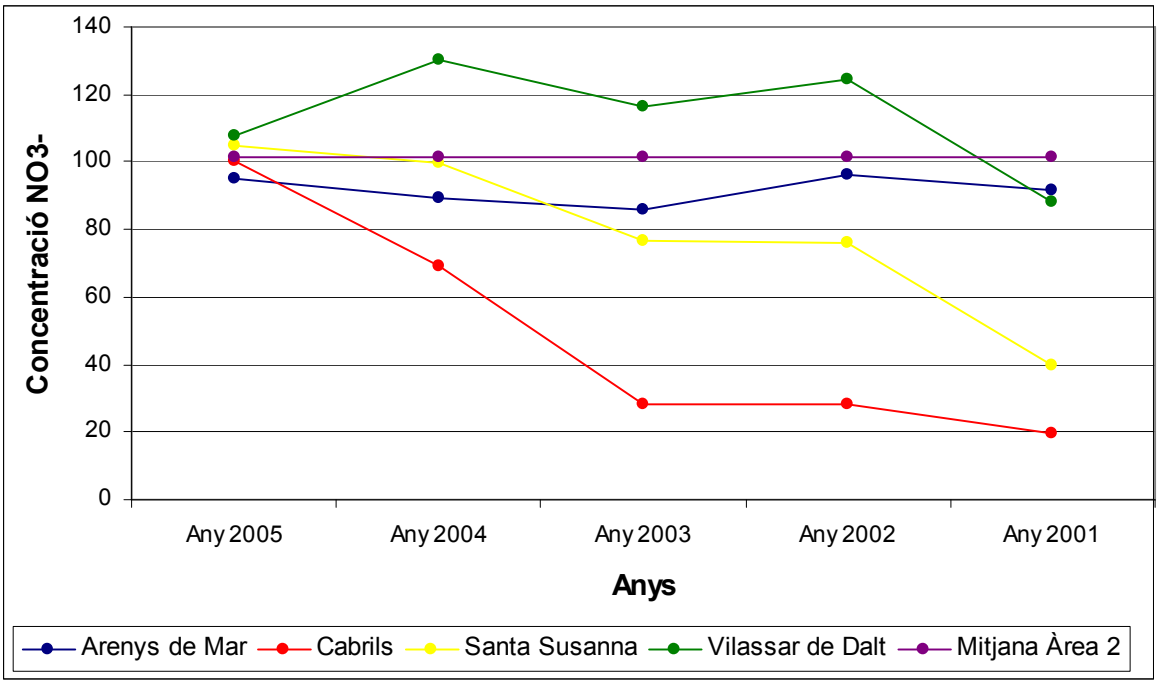


Figura 2.22 *Evolució històrica del nivell de nitrats als aqüífers dels quatre municipis analitzats*

Observant el gràfic, es pot veure que el municipi que presenta una major estabilitat en el nivell de nitrats, i a la vegada, una major proximitat amb la mitjana de la concentració a tota la zona, és Arenys de Mar.

Així doncs, el poble escollit com a cas d'estudi per tal de desenvolupar aquest projecte, és **Arenys de Mar**.

2.3.1. Parametrització de l'aigua a tractar

Mitjançant l'opció de consulta interactiva de la pàgina web de l'ACA, s'han obtingut els resultats de les analítiques realitzades al llarg del 2005, als diferents pous de control de la qualitat de l'aigua subterrània a Arenys de Mar. I amb aquests resultats, s'ha realitzat una caracterització físico-química dels aqüífers d'Arenys de Mar, obtenint-se la taula 2.24.

Cal destacar que al realitzar aquesta recopil·lació de les analítiques realitzades als diferents pous d'Arenys de Mar al llarg del 2005, s'ha comprovat que les variacions de concentració dels components majoritaris (calci, sodi, magnesi, bicarbonats, clorurs, nitrats i sulfats) en les diverses analítiques realitzades, no eren massa importants. D'aquesta manera, es pot considerar com una caracterització totalment vàlida, haver realitzat la mitjana de les dades analítiques generades al llarg del 2005.

Paràmetre	Concentració
Amoni	0,08 mg/l
Bicarbonats	303,1 mg/l
Calci	135,2 mg/l
Clorurs	135,7 mg/l
Duresa total	475,6 mg/l
Magnesi	33,5 mg/l
Nitrats	95,1 mg/l
Nitrits	0,1 mg/l
Potassi	7 mg/l
Silici	21,4 mg/l
Sodi	62,8 mg/l
Sulfats	142,5 mg/l
TOC	1,8 mg/l
Conductivitat	1056 μS/cm
pH	7,6

Taula 2.24 *Caracterització físico-química dels aqüífers d'Arenys de Mar*

2.3.2. Cabal d'aigua a tractar

El municipi d'Arenys de Mar té una població d'uns 14.000 habitants, mentres que el consum mitjà d'aigua potable en la societat actual s'estima al voltant d'uns 300 litres/persona·dia.

Tenint en compte aquestes dades, i aplicant un factor de seguretat del 20%, per tal de poder cobrir pics de demanda o pèrdues de cabal al llarg de la xarxa de distribució, la quantitat d'aigua que s'ha de tractar per tal d'abastar tota la població d'Arenys de Mar és:

Cabal aigua a tractar = 14.000 hab * 0,3 m^3/hab·dia * 1,2 = 5.040 m^3/dia $\cong$ **5.000 m^3/dia**

3. Disseny d'una planta d'eliminació de nitrats mitjançant Intercanvi lònic

3.1. Introducció a la tecnologia

Intercanvi iònic és la tecnologia mitjançant la qual es produeix un intercanvi reversible de ions entre un sòlid (resina de bescanvi iònic) i un líquid, de forma que el sòlid no experimenta cap canvi permanent en la seva estructura.

L'intercanvi iònic és una tècnica àmpliament usada en el tractament d'aigües, a més de suposar un mètode de separació per molts processos que utilitzen altres líquids.

El seu ús està àmpliament extés en els processos de síntesi química, la recerca mèdica, la indústria alimentària, l'agricultura, i en moltes altres àrees.

El principal avantatge d'aquesta tecnologia és la seva capacitat d'utilitzar un cop rere un altre el material d'intercanvi iònic (resines de bescanvi iònic), ja que quan aquest es satura, només cal regenerar-lo, i un cop regenerat, ja es pot tornar a utilitzar.

La tecnologia es va començar a utilitzar a nivell industrial cap a l'any 1910, aplicant-se en la reducció de la duresa de les aigües, primer amb zeolites naturals, i més tard amb zeolites sintètiques.

A partir de l'any 1935 es van introduir les resines orgàniques sintètiques, les quals contenen grups sulfònics o amina, els quals s'usen per l'intercanvi reversible de cations o anions respectivament.

Actualment, les resines de bescanvi iònic estan formades per una matriu polimèrica, amb una distribució uniforme al llarg de la seva estructura dels ions actius, encarregats de realitzar l'intercanvi iònic.

Per facilitar el seu funcionament, les resines de bescanvi iònic treballen dins unes columnes o tancs, que disposen de tota la instrumentació i valvuleria necessaris per desenvolupar tot el procés operacional, sense que la matriu polimèrica s'hagi d'extreure en cap moment de la columna o tanc.

El funcionament de les resines de bescanvi iònic es basa en fer circular el líquid a tractar a través seu. Llavors, a mesura que el líquid avança a través de la resina, es produeix l'intercanvi de ions entre el líquid i la resina.

Quan s'ha assolit la capacitat total d'intercanvi de ions de la resina, es diu que aquesta està exhausta, i llavors, la resina s'ha d'aturar perqué cal regenerar-la. Per regenerar una resina, es fa circular una dissolució regeneradora a través seu, que li retorna els ions actius, encarregats de realitzar l'intercanvi iònic, que la resina ha anat perdent durant el seu cicle operacional.

Un cop s'ha acabat la regeneració, la resina s'esbandeix amb aigua, i ja es pot tornar a utilitzar fins que es torni a esgotar.

Així doncs, l'intercanvi iònic és una tecnologia discontinua, que treballa en cicle operacionals, ja que cada cert temps, les resines han d'aturar el seu funcionament per regenerar-se.

A més, en l'intercanvi iònic es consumeix una dissolució regeneradora, utilitzada per portar a terme les regeneracions de les resines. Aquesta dissolució regeneradora, un cop ha circulat a través de les resines per regenerar-les, es converteix en una corrent residual a gestionar.

A la figura 3.1 s'ha representat de forma esquemàtica el mètode de funcionament d'una planta d'intercanvi iònic.

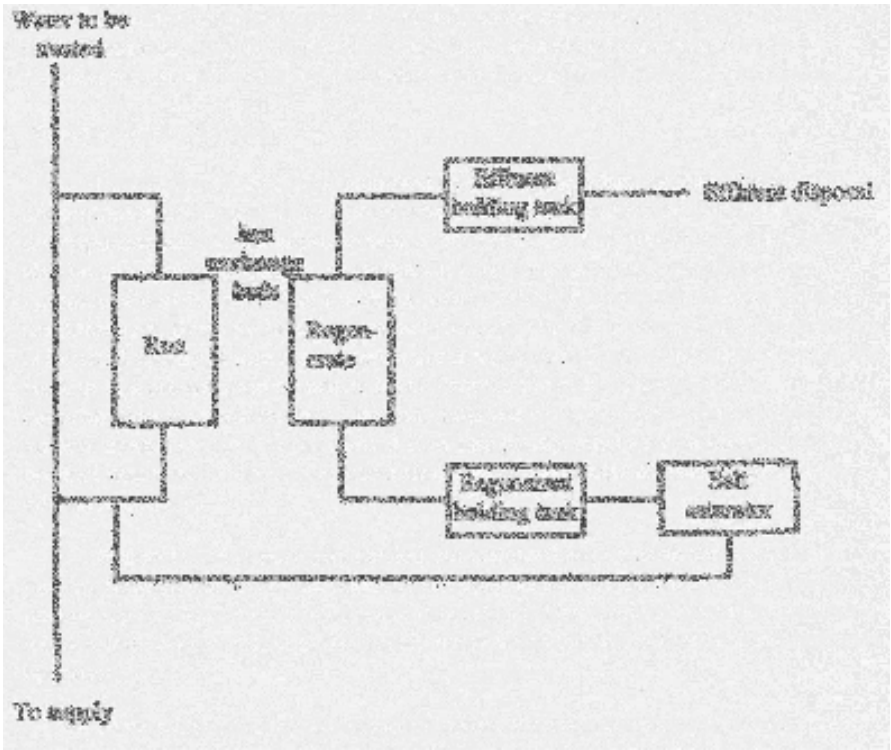


Figura 3.1 *Esquema de funcionament d'una planta d'intercanvi iònic*

Com es pot veure a la figura 3.1, per tal que les plantes d'intercanvi iònic puguin operar de forma contínua, com a mínim es necessiten dues columnes de treball, ja que mentres una està en funcionament, l'altre està regenerant-se o en stand-by.

Totes les columnes de la planta d'intercanvi iònic disposen de les canonades i valvuleria necessaris per portar a terme els cicle d'operació i regeneració sense haver-se de desplaçar.

A més, la planta disposa, com a mínim, d'un dipòsit de preparació de la dissolució regeneradora, i d'un dipòsit d'emmagatzematge de la corrent residual generada un cop la dissolució regeneradora ha circulat a través d'una resina exhausta.

En el cas de l'eliminació de nitrats, s'utilitzen resines aniòniques, on els ions NO_3^- extrets de l'aigua són reemplaçats per ions Cl^-, segons la següent reacció:

$$RCl^- + NO_3^- \rightarrow RNO_3^- + Cl^- \quad \text{(on R: resina bescanvi iònic)}$$

Normalment s'utilitzen resines aniòniques de base forta, on el grup funcional són amines quaternaries (Dahab i Bogardi, 1990).

Les resines aniòniques convencionals tenen una major afinitat per l'absorció de sulfats en front nitrats. Això comporta que les resines aniòniques convencionals eliminen preferencialment els sulfats de l'aigua tractada, i això provoca que disminueixi la seva capacitat d'eliminació de nitrats. Llavors, aquest fet pot comportar que si la presència de sulfats en l'aigua a tractar és molt elevada, les resines aniòniques convencionals no siguin capaces d'eliminar tots els nitrats desitjats, a més d'incrementar-se el consum de dissolució regeneradora i la quantitat de rebuig generat al procés (Croll, 1993).

Per això, existeixen unes resines aniòniques selectives als nitrats, les quals presenten una major afinitat per l'absorció de nitrats en front sulfats.

Les resines aniòniques selectives als nitrats són més cares que les resines aniòniques convencionals, i per això, l'elecció del tipus de resina a utilitzar depen de la ràtio sulfats/nitrats que presenta l'aigua a tractar.

Si la ràtio sulfats/nitrats a l'aigua a tractar és inferior a 1, s'usaran resines aniòniques convencionals. Per contra, si la ràtio sulfats/nitrats a l'aigua a tractar és superior a 1, s'usaran resines aniòniques selectives als nitrats (Croll, 1993).

La ràtio sulfats/nitrats de l'aigua a tractar es determina segons la fòrmula:

$$\text{Ràtio } SO_4^{2-}/NO_3^- = ([SO_4^{2-}] / 48 \text{ gr } SO_4^{2-}/\text{mol}) \cdot (14 \text{ gr } NO_3^-/\text{mol} / [NO_3^-])$$

En la ràtio sulfats/nitrats, les concentracions s'expressen en mg/l.

El pre-tractament necessari, previ a les resines de bescanvi iònic, per aigües subterrànies poc problemàtiques, es limita a una filtració de la matèria en suspensió (Dow Chemical, 2006).

És molt comú que les resines que estiguin treballant, operin desfasades entre elles dins el seu cicle operacional. D'aquesta manera s'aconsegueix homogeneitzar la qualitat de l'aigua de sortida, i evitar pics de concentració provocats per l'inici o el final del període operacional d'alguna de les resines (Andrews i Harward, 1994).

De fet, una organització de treball bastant adequada consisteix en utilitzar 3 tancs de desnitrificació, dels quals dos estan en funcionament desfasats un 50 % un respecte l'altre, mentres el tercer tanc està regenerant-se o en stand-by. A la vegada que es treballa amb cicles operacionals de 18 hores, de les quals 12 són de funcionament i 6 són de regeneració + stand-by (Andrews i Hardward, 1994).

Al cap d'un cert temps d'operació, la resina comença a trobar-se saturada de nitrats, i la seva capacitat d'intercanvi iònic es redueix dràsticament, de forma que la concentració de nitrats a l'aigua tractada augmenta progressivament.

Quan això succeeix, el procés s'ha d'aturar per tal que es pugui regenerar la resina. La regeneració de la resina es porta a terme amb una dissolució de NaCl, segons la següent reacció:

$$RNO_3^- + Cl^- \rightarrow RCl^- + NO_3^- \quad \text{(on R: resina bescanvi iònic)}$$

Tot i això, per tal d'evitar problemes de corrosivitat en l'aigua tractada, és comú utilitzar una dissolució regeneradora formada per una combinació de NaCl i $NaHCO_3$. D'aquesta manera, es disminueix la ràtio clorurs/bicarbonats de l'aigua tractada, i en conseqüència, es disminueix el seu potencial de corrosió (Fletcher et al, 1991).

El sistema de regeneració de les resines normalment és a contracorrent, de manera que quan estan operant, l'aigua circula de dalt cap a baix, però quan s'estan regenerant, la dissolució regeneradora circula de baix cap a dalt (Fletcher et al, 1991).

Un cop regenerada, la resina s'esbandeix amb aigua neta, i a continuació ja es troba preparada per ser retornada al procés d'eliminació de nitrats.

Per altra banda, cada cop que es porta a terme una regeneració es genera una corrent residual, altament concentrada en nitrats i clorurs.

3.2. Descripció del procés

3.2.1. Pre-tractament

❖ **Extracció de l'aigua a potabilitzar**

Es realitza mitjançant un pou, amb la profunditat necessària fins assolir el nivell dels aqüífers de la zona. Es considera que el nivell freàtic de l'aigua subterrània a la zona es situa al voltant dels 50 metres de profunditat.

Així doncs, el pou d'extracció d'aigua tindrà una profunditat d'uns 50 metres. El mètode constructiu emprat serà el de *tubs clavats*, basat en anar clavant seccions de tub al terra fins assolir la profunditat desitjada, i posteriorment buidar de sorra i terra l'interior dels tubs. D'aquesta manera s'eviten possibles despreniments del terreny durant la construcció del pou.

L'entrada d'aigua a l'interior del pou es realitzarà mitjançant una reixa a la seva part inferior, en contacte amb l'aqüífer. Aquesta reixa d'entrada d'aigua presentarà una densitat de 2.100 forats/m^2 tub. I la secció de cadascun dels forats serà de 1,5 cm^2, superfície suficientment petita per evitar que entri sorra i grava a l'interior del pou.

L'altura de la reixa d'entrada d'aigua serà de 1 metre, i el diàmetre interior del pou de 2 metres.

A més, la velocitat d'entrada d'aigua al pou es situarà en un màxim de 50 mm/seg, ja que velocitats superiors podrien provocar un assecament del pou a llarg termini.

Amb totes aquestes dades, el cabal màxim d'extracció d'aigua del pou resulta ser:

- Superfície total reixa d'entrada d'aigua = $\pi \cdot \varnothing_{pou} \cdot H_{reixa\ entrada} = \pi \cdot 2 \cdot 1 = 6{,}283\ m^2$

- Secció de pas aigua = Superfície reixa entrada · Densitat forats reixa =

= 6,283 m^2 reixa · 2.100 forats/m^2 reixa · 0,00015 m^2/forat = 1,979 m^2 secció pas

- Cabal màxim extracció aigua = Secció de pas aigua · velocitat màxima entrada aigua =

= 1,979 m^2 secció pas · 0,05 m/s = 0,0989 m^3/seg = 8.550 m^3/dia

Com es pot observar, el pou està correctament dimensionat per tal d'extreure els 5.000 m^3/dia previstos d'aigua a tractar. I fins i tot es disposa d'un marge de treball de 3.550 m^3/dia, pel cas que en el futur es volgués incrementar el cabal d'aigua potable subministrada a la població.

Per altra banda, la instal·lació d'extracció d'aigua del pou estarà formada per:

- 2 bombes centrífugues submergibles, una en operació i l'altre de reserva. Per tal que cap de les dues bombes no estigui massa temps aturada, el seu funcionament s'anirà alterant mitjançant una maniobra elèctrica automatitzada.

  Cal tenir en compte que les bombes submergibles no disposen d'oli de lubricació als seus rodaments, sinó que és la pròpia aigua que envolta la bomba qui realitza la lubricació i refrigeració d'aquesta. Per això, és molt important que la bomba es trobi sempre totalment submergida i coberta d'aigua.

  A més, també és important tenir en compte que el motor que acciona aquestes bombes submergibles es troba unit a elles, de manera que també està submergit a l'aigua. Per això, els cables elèctrics d'alimentació dels motors han d'estar recoberts d'algun material termoplàstic, que sigui impermeable a l'aigua.

- 1 vàlvula d'aspiració i 1 vàlvula d'impulsió per cadascuna de les dues bombes hidràuliques. Aquestes vàlvules permetran aïllar les bombes de la resta de la instal·lació, per quan sigui necessari extreure-les per tal de realitzar-hi tasques de manteniment.

- Una canonada metàl·lica d'impulsió d'aigua per cadascuna de les dues bombes hidràuliques. Les canonades mesuraran uns 50 metres de llargada i tindran un diàmetre interior de 40 cm.

Per tal d'aconseguir tractar els 5.000 m^3/dia, i tenint en compte que en tot moment funcionarà només una de les dues bombes, el cabal d'impulsió de cadascuna d'elles hauria de ser de 208,3 m^3/h.

Però per tal de no treballar just al límit, aplicarem un cabal de treball de les bombes de 250 m^3/h, de manera que la capacitat màxima d'extracció d'aigua del sistema de bombeig serà de 6.000 m^3/dia.

Aquest cabal màxim de 6.000 m^3/dia del sistema de bombeig, no supera la capacitat màxima d'extracció d'aigua del pou de 8.550 m^3/dia. Per tant, no hi ha cap problema amb que el cabal operacional del sistema de bombeig sigui de 250 m^3/h.

Llavors, segons l'Àbac de Darcy, situat en la figura 3.2, i tenint en compte que la canonada d'impulsió de l'aigua extreta del pou és mètal·lica, de 40 cm de diàmetre interior i amb un cabal d'aigua de 250 m^3/h circulant pel seu interior:

- El factor de la pèrdua de càrrega de l'aigua al circular a través de la canonada d'impulsió és de 2,5 metres/km tub.

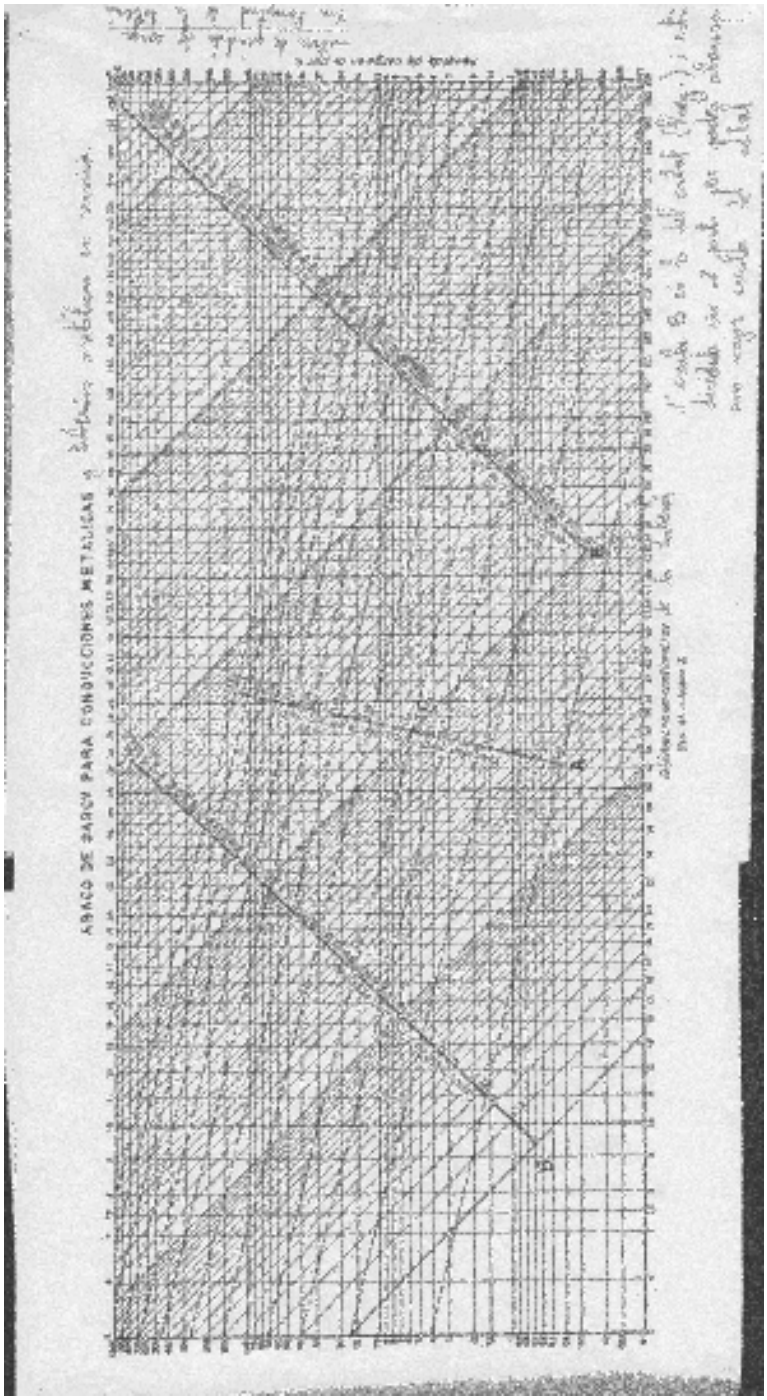


Figura 3.2 *Àbac de Darcy per canonades metàl·liques*

Les pèrdues de càrrega primàries seran les originades pels 50 metres de llargada de la canonada d'impulsió, mentres que les pèrdues de càrrega secundàries seran les originades per la vàlvula d'aspiració, la vàlvula d'impulsió i el colze + la vàlvula de descàrrega per tal d'abocar l'aigua extreta del pou al dipòsit de regulació d'aigua a tractar.

Així doncs, segons la taula de pèrdues de càrrega secundàries de la figura 3.3, per un diàmetre de canonada de 40 cm, les pèrdues de càrrega secundàries originades per un colze normalitzat es poden assimilar a 12 metres de llargada de canonada, i les pèrdues de càrrega secundàries originades per una vàlvula de retenció es poden assimilar a 30 metres de llargada de canonada.

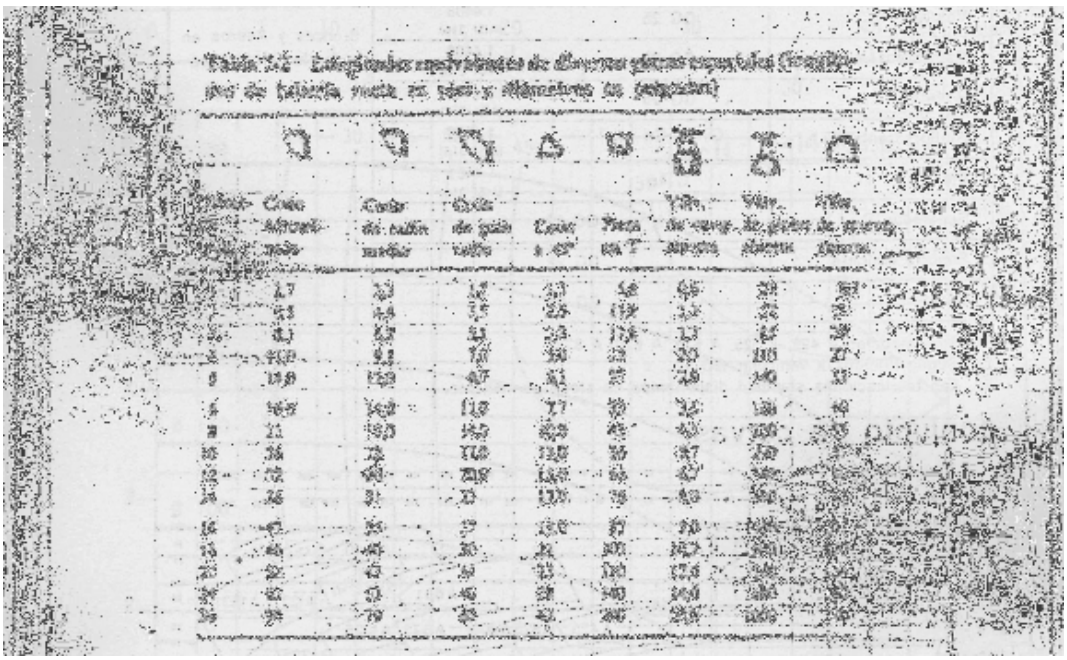


Figura 3.3 *Taula de pèrdues de càrrega secundàries*

Llavors, tenint en compte tant les pèrdues de càrrega primàries com les secundàries, la pèrdua de càrrega total que experimenta l'aigua al circular a través de la canonada d'impulsió és:

Pèrdues de càrrega en la canonada d'impulsió d'aigua del pou =

= pèrdues de càrrega primàries + pèrdues de càrrega secundàries =

= 0,05 km tub · 2,5 m/km tub + [(12+(3·30))/1000] km tub · 2,5 m/km tub =

= 0,38 ≅ 0,5 metres

En conseqüència, si el cabal operacional és de 250 m^3/h, la profunditat del pou de 50 metres, les pèrdues de càrrega de la canonada d'impulsió de 0,5 metres, i els rendiments de la bomba i el motor de 0,6 i 0,98 respectivament:

Potència teòrica bombes = (força · longitud) / temps =

250.000 kg/h · 50,5 metres = 12.625.000 kg·m/h = 3.506,94 kg·m/s

Potència real bombes = Potència teòrica / rendiments =

= 3.506,94 / (0,6 · 0,98) = 5.964,2 Kg·m/seg = 58,45 Kw

Per tant, les bombes d'extracció d'aigua del pou han de tenir una potència d'uns 58,5 Kw, i el seu punt de treball estarà situat en un cabal de 250 m^3/h i una alçada manomètrica total de 50,5 metres.

❖ **Emmagatzematge de l'aigua a tractar**

Un cop s'ha extret l'aigua a potabilitzar del pou, aquesta s'emmagatzema en un dipòsit de regulació, que serveix de bassa pulmó per cobrir puntes hidràuliques de demanda. El volum d'aquest dipòsit serà d'un 10% de la quantitat total d'aigua a tractar diàriament (500 m^3), i el material constructiu emprat serà el formigó armat.

A més, aquest dipòsit de regulació també serveix per realitzar el repartiment entre l'aigua que es tracta a les resines i la que es by-passa directament cap al final del procés de desnitrificació.

O sigui, com que l'aigua tractada a les resines de bescanvi iònic presenta una concentració en nitrats quasi nul·la ($\cong$ 3 mg/l), es pot barrejar amb una part d'aigua no tractada, fins assolir el valor desitjat de 25 mg/l de NO_3^- a l'aigua de sortida. D'aquesta manera s'aconsegueixen reduir els costos d'explotació, mantenint el nivell de nitrats en l'aigua subministrada en el valor recomenat per la Unió Europea (Woodward, 1994).

Llavors, la quantitat de cabal que s'ha de tractar a les resines es determina a partir de les següents dades:

- Cabal total a subministrar a la població = Qt = 5.000 m^3/dia
- Concentració desitjada de NO_3^- a l'aigua subministrada = $[NO_3^-]t$ = 25 mg/l
- Cabal a tractar per les resines de bescanvi iònic = Qr (m^3/dia)

- Concentració estimada de NO_3^- a l'aigua desnitrificada = $[NO_3^-]r$ = 3 mg/l
- Cabal d'aigua by-passada = Qb (m^3/dia)
- Concentració de NO_3^- en l'aigua by-passada = $[NO_3^-]b$ = 95 mg/l

La relació entre aquests paràmetres es pot observar a continuació, en la figura 3.4.

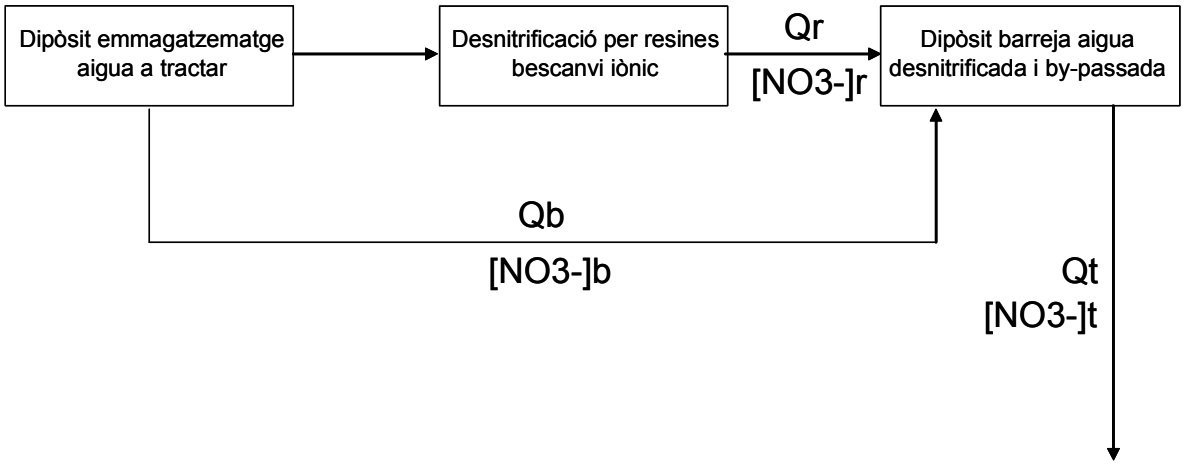


Figura 3.4 *Esquema dels corrents d'aigua tractada per les resines i aigua by-passada*

Si realitzem un balanç màssic global obtenim:

$$Qt = Qb + Qr$$

$$5.000 = Qb + Qr$$

$$Qb = 5.000 - Qr$$

Si apliquem un balanç de masses referenciat a la concentració de nitrats:

$$Qt \cdot [NO_3^-]t = Qr \cdot [NO^-]r + Qb \cdot [NO_3^-]b$$

$$5.000 \cdot 25 = Qr \cdot 3 + (5.000 - Qr) \cdot 95$$

$$Qr = 3.804 \cong 3.800 \ m^3/dia$$

Així doncs, el cabal d'aigua que s'ha de tractar a les resines de bescanvi iònic és de 3.800 m^3/dia, i el cabal d'aigua que es pot by-passar cap al final del procés de desnitrificació és de (5.000 – 3.800) = 1.200 m^3/dia.

Per altra banda, també és important comentar que aquest dipòsit tindrà instal·lades dues sondes de nivell, una de nivell mínim i l'altre de nivell màxim. Quan el contingut del dipòsit disminueixi per sota la sonda de nivell mínim, la senyal generada per aquesta sonda, mitjançant un automatisme elèctric, posarà en funcionament una de les dues bombes d'extracció d'aigua del pou, per tal de tornar a emplenar el dipòsit.

Per contra, quan el contingut del dipòsit superi la sonda de nivell màxim, la senyal generada per aquesta sonda, mitjançant un automatisme elèctric, aturarà el funcionament de la bomba hidràulica del pou que en aquell moment estigui en marxa. A més, aquest automatisme elèctric d'aturada del bombament, també serà l'encarregat de realitzar l'alternància de funcionament entre les dues bombes del pou, mitjançant un relé elèctric.

D'aquesta manera, quan la sonda de nivell mínim torni a activar el bombament del pou, la bomba que es posarà en marxa serà la que restava aturada l'últim cop que s'havia extret aigua del pou.

- **Filtració de la matèria en suspensió**

L'aigua que arriba a les resines de bescanvi iònic no pot presentar un contingut elevat en partícules en suspensió o en col·loides, ja que sinó aquests obturarien fàcilment els poros de les resines, fent-les malbé. Els fabricants de resines recomanen que l'aigua d'entrada no presenti una concentració en MeS superior a 1 mg/l (Dow Chemical, 2006).

Per això, prèviament a les resines de bescanvi iònic, l'aigua a desnitrificar es fa circular a través d'uns filtres de cartutxos, que retenen la matèria en suspensió.

Cadascun d'aquests filtres, conté al seu interior 6 cartutxos filtrants, els quals són de polipropilè bobinat i presenten una selectivitat de 5 μm, de manera que retenen les partícules en suspensió i els col·loides de tamany superior a 5 μm.

Es situaran 20 filtres de cartutxos, operant en paral·lel. Tenint en compte que la capacitat de filtració de cadascun d'ells es situa al voltant dels 15 m^3/h, la capacitat total de filtració de la MeS en el pre-tractament de la planta serà de (20 · 15 · 24) = 7.200 m^3/dia.

L'etapa de filtració de la MeS és un pas essencial pel correcte funcionament de tota la planta, i en conseqüència, ha d'operar en continu i correctament.

Llavors, per tal d'assegurar aquest funcionament correcte i continuat de l'etapa de filtració de la MeS, és molt important portar a terme un manteniment adequat dels filtres de cartutxos.

I per aconseguir desenvolupar aquest manteniment adequat dels filtres de cartutxos, aquests s'han d'aturar de forma periòdica, per tal de revisar-los i netejar-los.

És per això que s'ha decidit sobredimensionar l'etapa de filtració de la MeS (capacitat de 7.200 m^3/h), ja que així es podran desenvolupar sense problemes les tasques de manteniment dels filtres.

Per tal de controlar l'evolució del funcionament dels filtres, s'ha d'instal·lar un manòmetre de pressió diferencial a cada filtre, que prengui valors de pressió a l'entrada i la sortida del filtre.

Quan el valor marcat pel manòmetre és superior a 1 bar, els cartutxos filtrants que hi ha a l'interior del filtre s'han de netejar amb una dissolució d'hipoclorit sòdic al 15 %, durant un període de temps comprés entre 45 i 55 minuts, i després ja es poden retornar al filtre.

Però si després de realitzar aquesta operació de neteja, el manòmetre encara marca una diferència de pressió entre l'entrada i la sortida del filtre, superior a 1 bar, els cartutxos filtrants ja no es poden reutilitzar, i s'han de canviar per uns de nous.

3.2.2. Eliminació de nitrats mitjançant intercanvi iònic

❖ **Resines de bescanvi iònic**

La desnitrificació mitjançant intercanvi iònic es realitzarà amb tres columnes, de manera que mentres dues d'elles estiguin funcionant, la tercera estarà regenerant-se o en stand-by. Amb aquesta mesura, es pretèn que el procés de desnitrificació pugui treballar en continu, i que quan s'hagi de regenerar una resina, això no afecti el funcionament global de la planta (Andrews i Harward, 1994).

A més, les dues columnes que estiguin treballant, ho faran desfasades un 50 % una de l'altre, en el seu cicle operacional. D'aquesta manera s'aconseguirà homogeneitzar la qualitat de l'aigua de sortida, i evitar pics de concentració provocats per l'inici o el final del període operacional de les resines (Andrews i Harward, 1994).

Llavors, el cabal d'aigua que haurà de tractar cada columna serà:

$$Q\ columna = 3.800\ m^3/dia \cdot (1\ dia / 24\ h) \cdot (procés / 2\ columnes) = 79{,}16\ m^3/h \cong 80\ m^3/h$$

Per altra banda, el temps de funcionament de cada resina serà de 12 hores, període després del qual la resina s'aturarà per ser regenerada. Tenint en compte això, cada resina disposarà de 6 hores per ser regenerada, abans de tornar a entrar en funcionament (Andrews i Harward, 1994).

L'esquema de treball de les tres columnes, es pot observar a continuació en el següent diagrama de Gantt (figura 3.5):

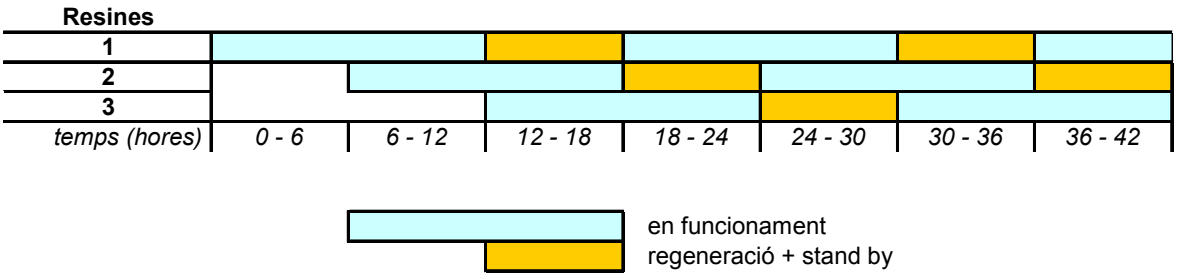


Figura 3.5 *Diagrama de Gantt del cicle operacinal de les 3 resines de bescanvi iònic*

El sistema de regeneració de les resines serà a contracorrent, de manera que quan estiguin operant, l'aigua circularà de dalt cap a baix, però quan s'estiguin regenerant, la dissolució regeneradora circularà de baix cap a dalt (Fletcher et al, 1991).

A més, quan la resina es regeneri, s'injectarà aire a pressió per la part superior, per tal de mantenir fixada la matriu polimèrica, i evitar que la regeneració a contracorrent la desplaci (Fletcher et al, 1991).

Les regeneracions es realitzaran amb una dissolució de NaCl al 6 % i a temperatura ambient. En cada regeneració, s'aplicaran 100 gr. de NaCl per litre de resina (Dow Chemical, 2006).

La ràtio sulfats/nitrats de l'aigua a tractar és:

$$\text{Ràtio } SO_4^{2-}/NO_3^- = (142{,}5 \text{ ppm } SO_4^{2-} / 48 \text{ gr } SO_4^{2-}/\text{mol}) \cdot (14 \text{ gr } NO_3^-/\text{mol} / 95{,}1 \text{ ppm } NO_3^-) = 0{,}437$$

Com que la ràtio sulfats/nitrats a l'aigua a tractar és inferior a 1, s'usaran resines no selectives als nitrats (Croll, 1993).

Les resines utilitzades seran aniòniques, de base forta i tipus I (Dahab i Bogardi, 1990).

Per tal de comprovar el correcte funcionament de les resines dissenyades, i observar el comportament global del procés de desnitrificació per intercanvi iònic, s'ha simulat la instal·lació mitjançant el software informàtic Cadix, un programa de simulació de processos de bescanvi iònic, creat i patentat per l'empresa Dow Chemical.

Seguidament es mostren, de forma gràfica, els diversos passos que s'han anat seguint dins el programa Cadix, per tal de simular el funcionament de les resines dissenyades.

Primer de tot, tal i com es pot observar en la figura 3.6, s'ha introduit la parametrització química de l'aigua a tractar.

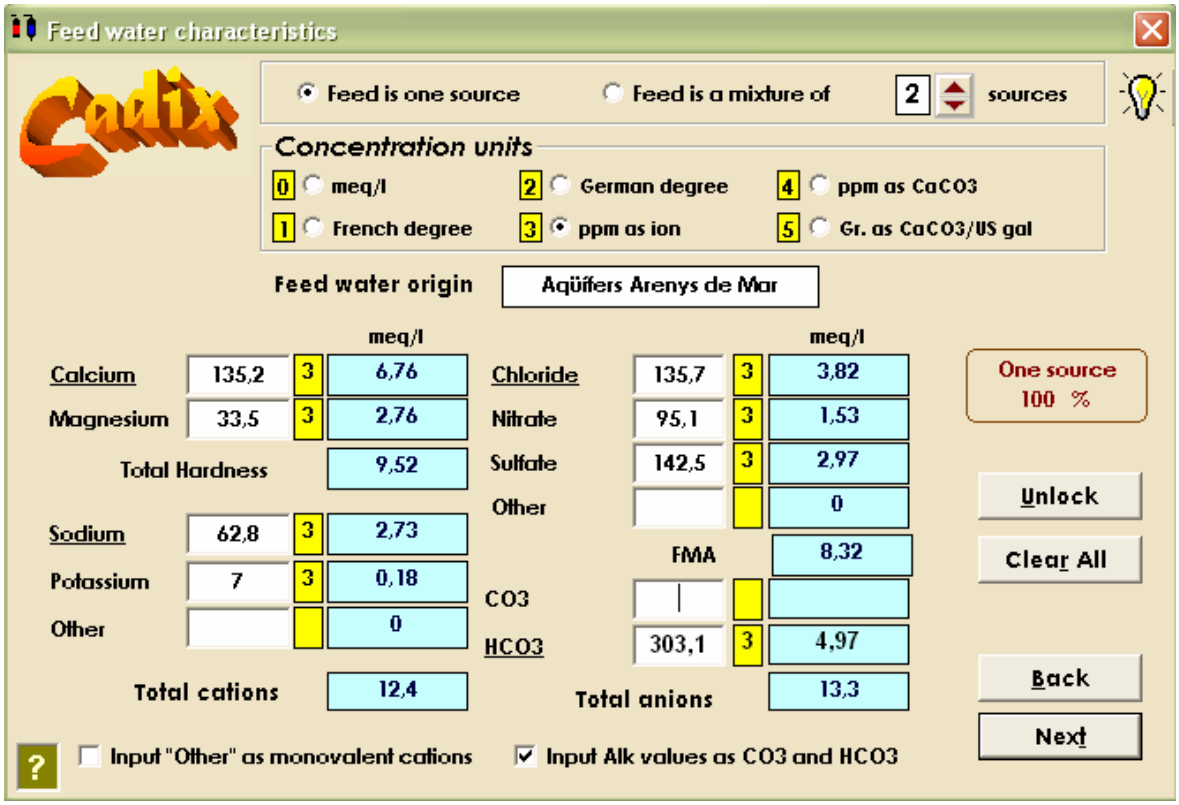


Figura 3.6 *Introducció de la parametrització química de l'aigua a tractar, al programa CADIX*

A continuació, tal i com es pot observar en la figura 3.7, s'introdueixen la resta de paràmetres físico-químics necessaris per caracteritzar l'aigua a tractar (ph, temperatura, MeS…).

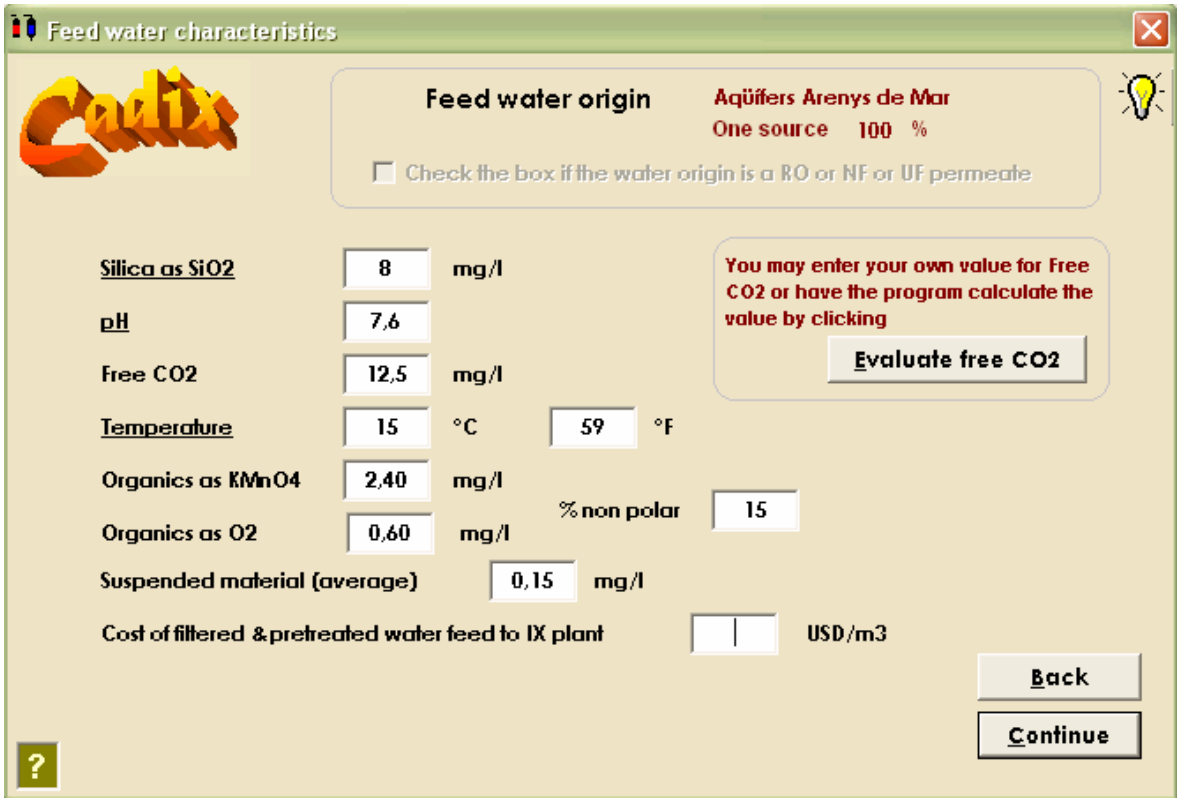


Figura 3.7 *Caracterització físico-química de l'aigua a tractar, al programa CADIX*

El tercer pas, consisteix en determinar el tipus de resina utilitzada i les seves condicions de regeneració. En el nostre cas, tal i com es pot observar en la figura 3.8, s'ha escollit treballar amb resines aniòniques de base forta (SBA), amb regeneració a contra-corrent, i injectant aire a pressió per la part superior per tal de mantenir fixada la matriu polimèrica mentres es realitza la regeneració.

Figura 3.8 *Elecció del tipus de resina i les condicions de regeneració, al programa CADIX*

El quart pas, consisteix en establir les característiques operacionals de la planta de desnitrificació (número de columnes, cabal operacional de cada resina, temps de funcionament entre dues regeneracions…). Aquest pas s'ha representat a la figura 3.9.

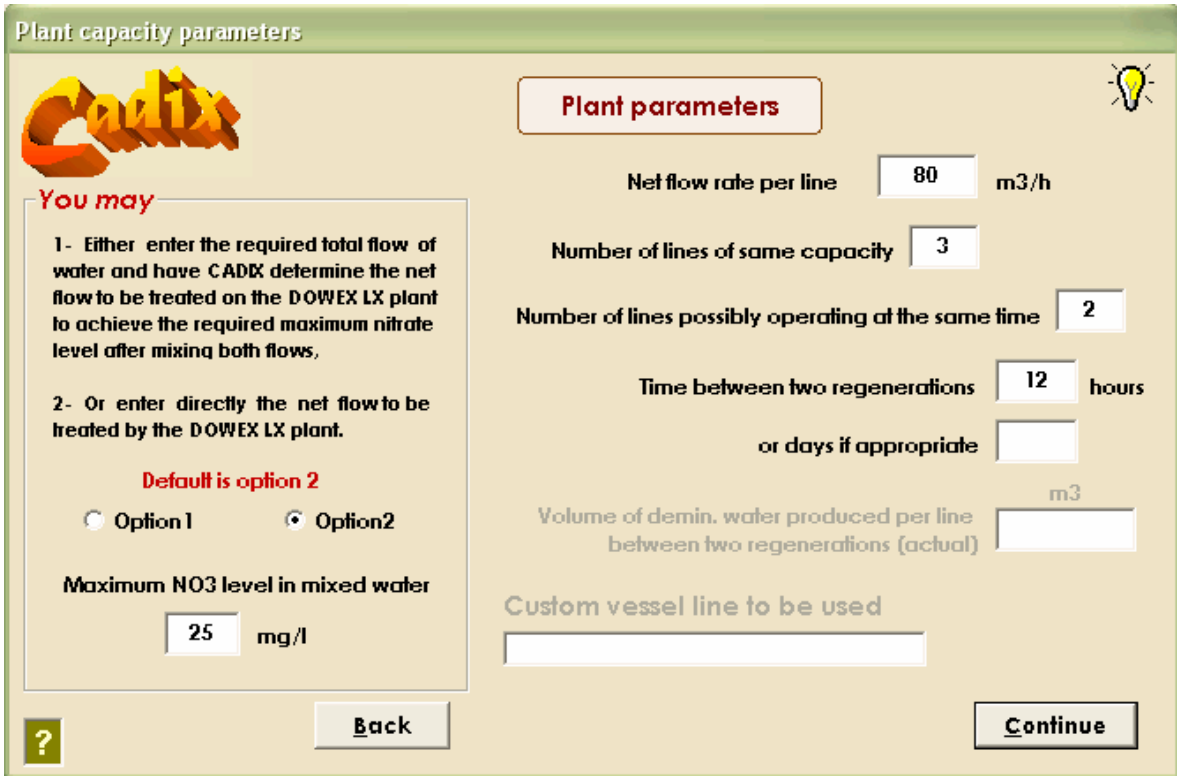


Figura 3.9 *Característiques operacionals de la planta de desnitrificació, al programa CADIX*

En el cinqué pas, tal i com es pot observar en la figura 3.10, s'escullen els paràmetres operacionals de les regeneracions de les resines.

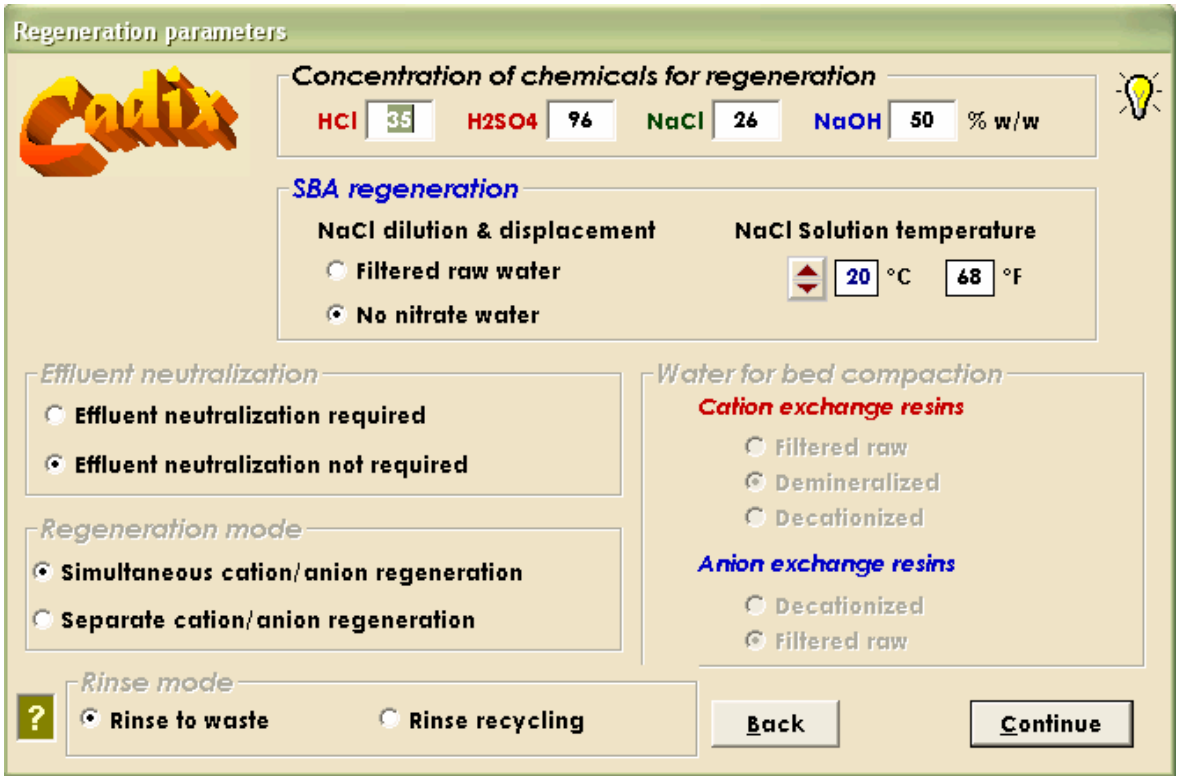


Figura 3.10 *Determinació de les característiques de les regeneracions, al programa CADIX*

En el sisé pas, es tria el model de resina de la companyia Dow Chemical a utilitzar. En el nostre cas, tal i com es pot veure en la figura 3.11, s'ha decidit treballar amb el model Marathon A.

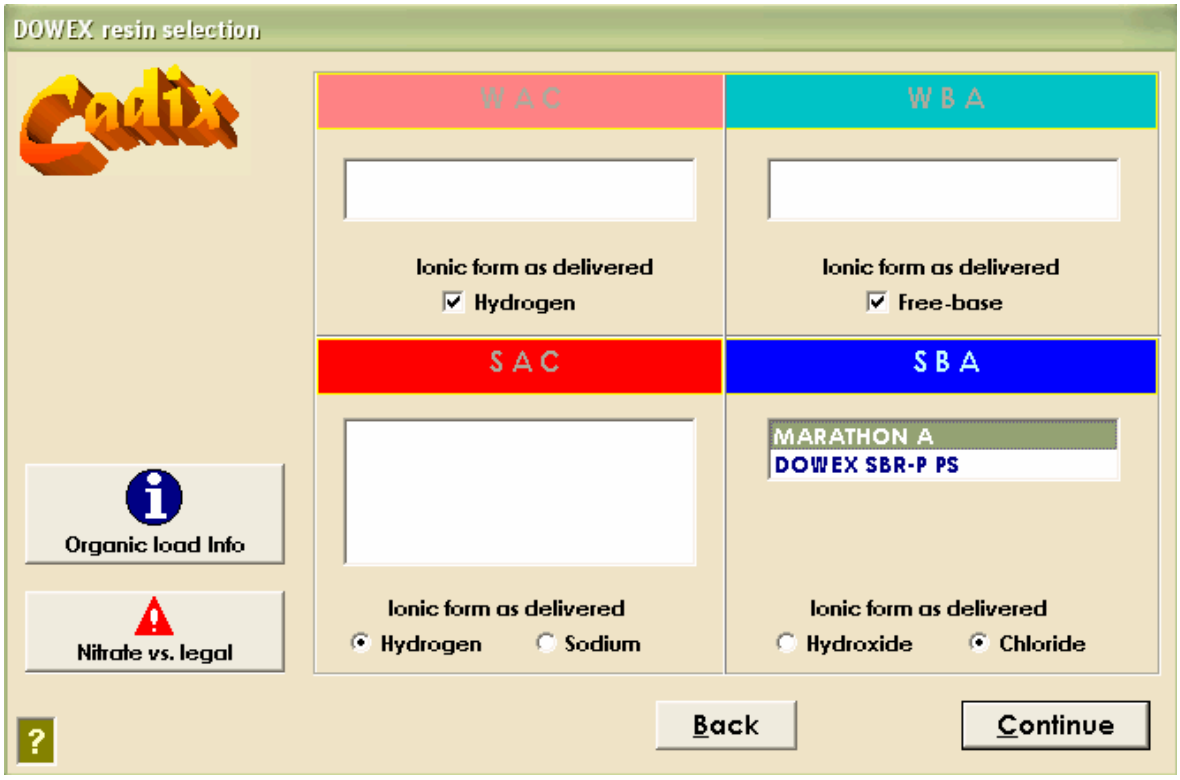
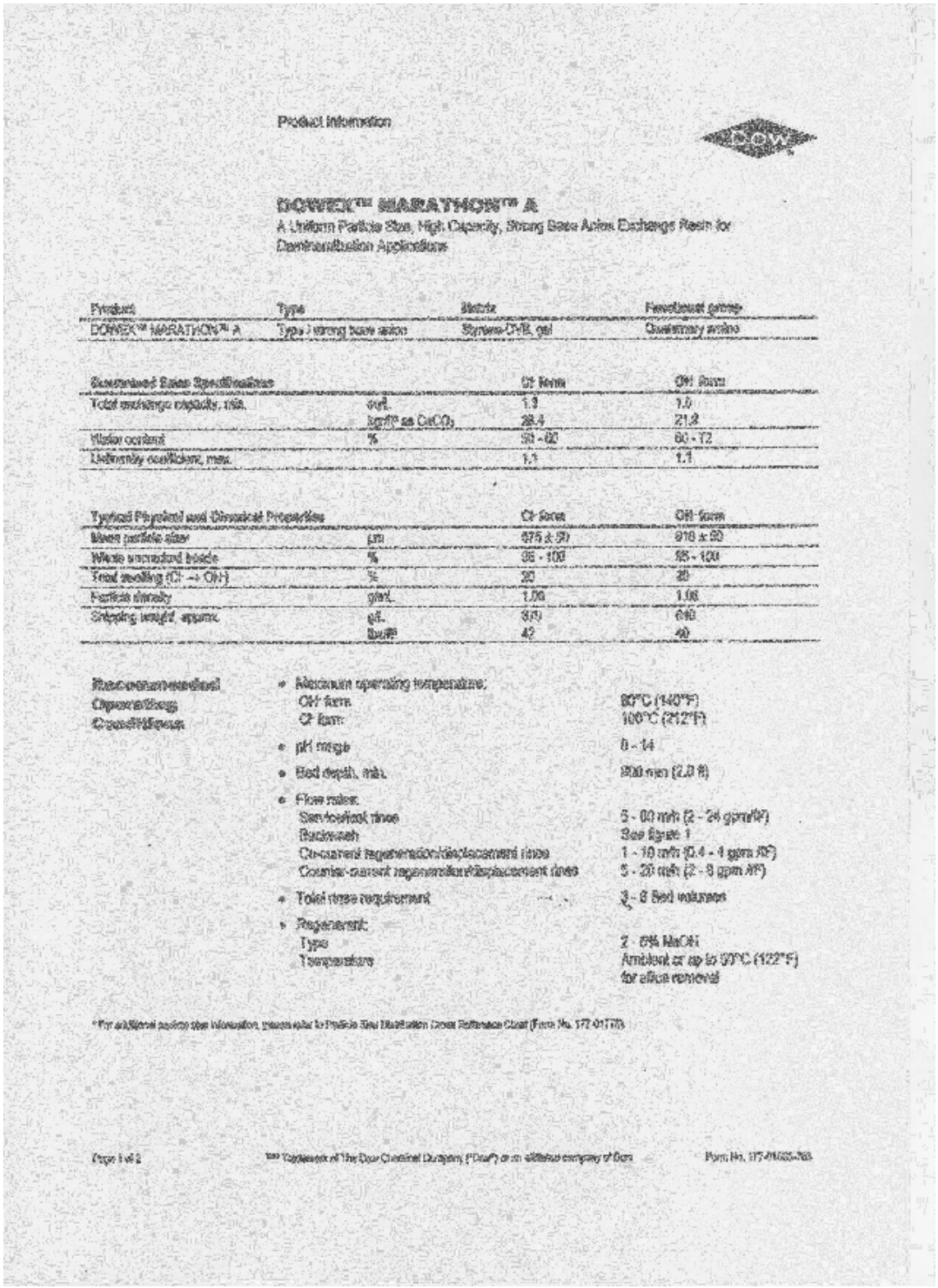


Figura 3.11 *Elecció del model de resina a utilitzar, al programa CADIX*

El model Marathon A, és una resina aniònica de base forta i tipus I. La seva matriu polimèrica té una distribució uniforme del tamany de partícules al llarg de la resina. A més, la matriu polimèrica és de tipus gel, basada en un copolímer format per estiré-divinilbenzé, on els grups funcionals són amines quaternàries. Seguidament, a la figura 3.12 es poden observar les característiques tècniques de la resina Dowex Marathon A.



Product Information

DOWEX™ MARATHON™ A

A Uniform Particle Size, High Capacity, Strong Base Anion Exchange Resin for Demineralization Applications

Product	Type	Matrix	Functional group
DOWEX™ MARATHON™ A	Type I strong base anion	Styrene-DVB, gel	Quaternary amine

Summarized Sales Specifications		Cl⁻ form	OH⁻ form
Total exchange capacity, min.	eq/L	1.3	1.0
	kgr/ft³ as $CaCO_3$	28.4	21.8
Water content	%	50 - 60	60 - 72
Uniformity coefficient, max.		1.1	1.1

Typical Physical and Chemical Properties		Cl⁻ form	OH⁻ form
Mean particle size	µm	675 ± 50	610 ± 50
Whole uncracked beads	%	95 - 100	95 - 100
Total swelling (Cl⁻ → OH⁻)	%	20	20
Particle density	g/mL	1.06	1.06
Shipping weight, approx.	g/L	670	640
	lbs/ft³	42	40

Recommended Operating Conditions

- Maximum operating temperature:
  - OH⁻ form: 80°C (140°F)
  - Cl⁻ form: 100°C (212°F)
- pH range: 0 - 14
- Bed depth, min.: 800 mm (2.0 ft)
- Flow rates:
  - Service/cleat rinse: 5 - 60 m/h (2 - 24 gpm/ft²)
  - Backwash: See figure 1
  - Co-current regeneration/displacement rinse: 1 - 10 m/h (0.4 - 4 gpm /ft²)
  - Counter-current regeneration/displacement rinse: 5 - 20 m/h (2 - 8 gpm /ft²)
- Total rinse requirement: 3 - 8 Bed volumes
- Regenerant:
  - Type: 2 - 6% NaOH
  - Temperature: Ambient or up to 50°C (122°F) for silica removal

* For additional service data information, please refer to Particle Size Distribution Cross Reference Chart (Form No. 172-01778)

Page 1 of 2 ™ Trademark of The Dow Chemical Company ("Dow") or an affiliated company of Dow Form No. 172-01665-763

Figura 3.12 *Característiques tècniques de la resina Dowex Marathon A*

Finalment, un cop escollit el model de resina a utilitzar, el seté i últim pas del programa Cadix permet seleccionar la quantitat de regenerant a aplicar durant la regeneració de les resines. En el nostre cas, tal i com es mostra a la figura 3.13, s'ha decidit aplicar 100 gr. de NaCl per cada litre de resina a regenerar.

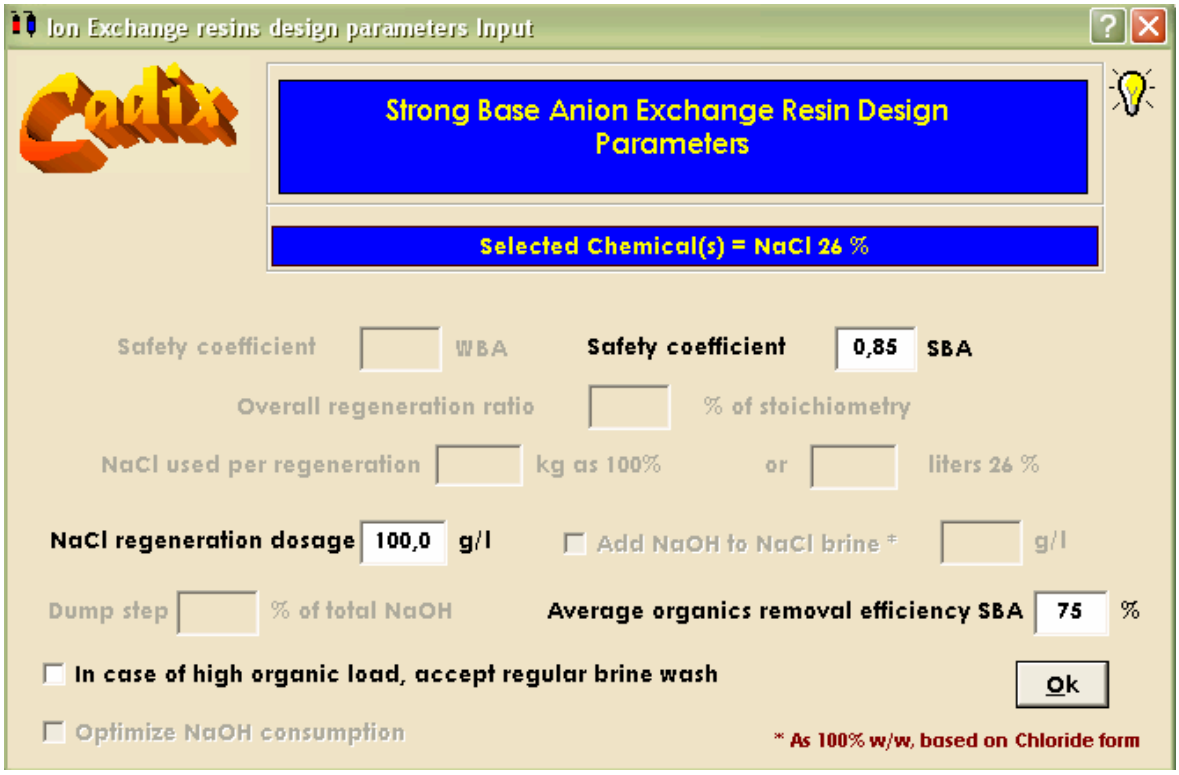
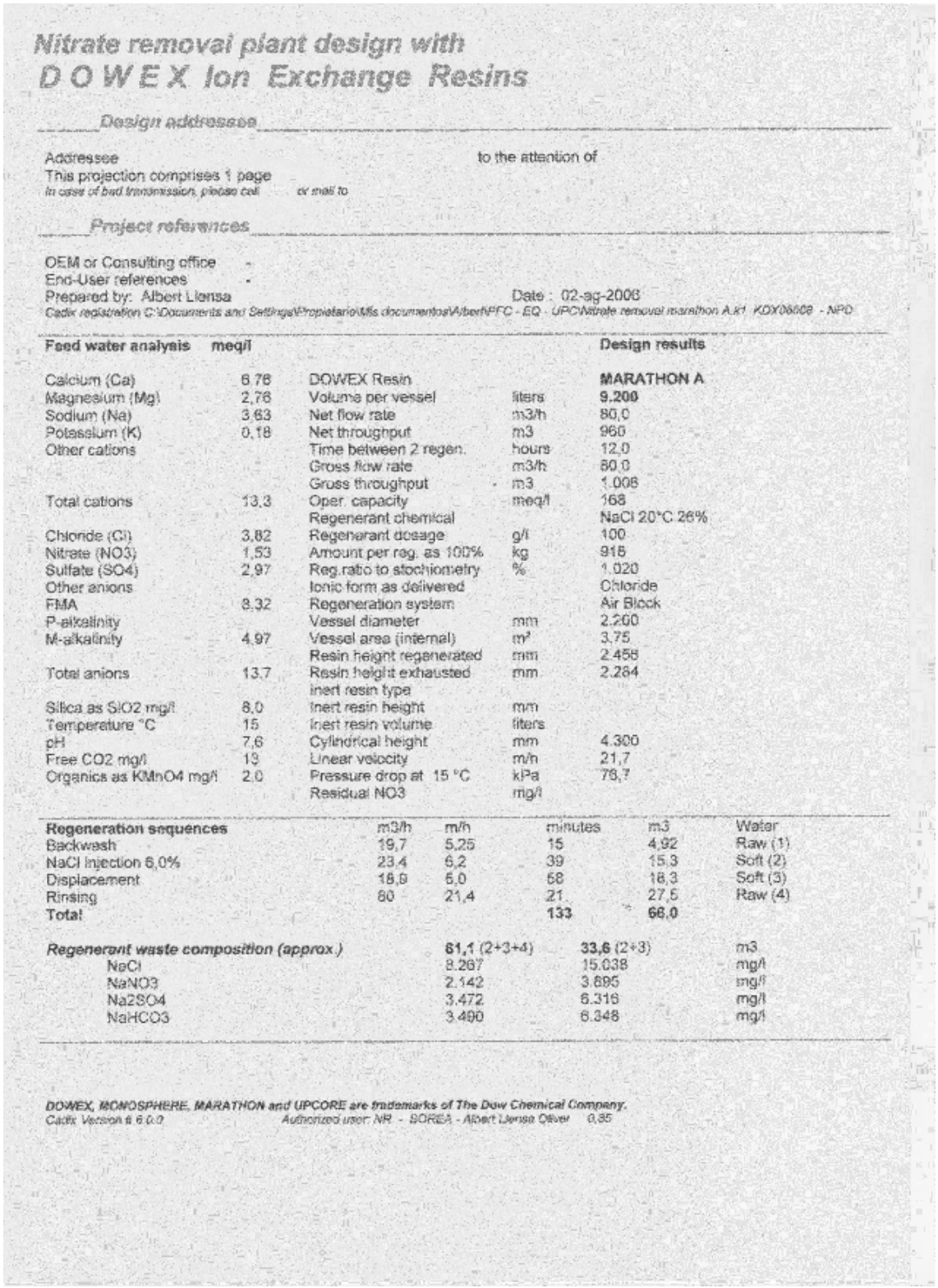


Figura 3.13 *Selecció de la quantitat de regenerant a aplicar, al programa CADIX*

Llavors, els resultats obtinguts mitjançant la simulació informàtica es poden observar a les figures 3.14 i 3.15, on es mostren els informes generats pel programa un cop finalitzada la simulació.



Nitrate removal plant design with DOWEX Ion Exchange Resins

Design addressee

Addressee — to the attention of
This projection comprises 1 page
In case of bad transmission, please call — or mail to

Project references

OEM or Consulting office -
End-User references -
Prepared by: Albert Llensa — Date : 02-ag-2006
Cadix registration C:\Documents and Settings\Propietario\Mis documentos\Albert\FFC - EQ - UPC\Nitrate removal marathon A.kt KDX06008 - NPD

Feed water analysis	meq/l				Design results
Calcium (Ca)	6,76	DOWEX Resin			MARATHON A
Magnesium (Mg)	2,76	Volume per vessel	liters		**9.200**
Sodium (Na)	3,63	Net flow rate	m3/h		80,0
Potassium (K)	0,18	Net throughput	m3		960
Other cations		Time between 2 regen.	hours		12,0
		Gross flow rate	m3/h		80,0
		Gross throughput	m3		1.008
Total cations	13,3	Oper. capacity	meq/l		168
		Regenerant chemical			NaCl 20°C 26%
Chloride (Cl)	3,82	Regenerant dosage	g/l		100
Nitrate (NO3)	1,53	Amount per reg. as 100%	kg		916
Sulfate (SO4)	2,97	Reg.ratio to stochiometry	%		1.020
Other anions		Ionic form as delivered			Chloride
FMA	8,32	Regeneration system			Air Block
P-alkalinity		Vessel diameter	mm		2.200
M-alkalinity	4,97	Vessel area (internal)	m²		3,75
		Resin height regenerated	mm		2.455
Total anions	13,7	Resin height exhausted	mm		2.284
		Inert resin type			
Silica as SiO2 mg/l	8,0	Inert resin height	m/m		
Temperature °C	15	Inert resin volume	liters		
pH	7,6	Cylindrical height	mm		4.300
Free CO2 mg/l	19	Linear velocity	m/h		21,7
Organics as KMnO4 mg/l	2,0	Pressure drop at 15 °C	kPa		76,7
		Residual NO3	mg/l		

Regeneration sequences	m3/h	m/h	minutes	m3	Water
Backwash	19,7	5,25	15	4,92	Raw (1)
NaCl injection 6,0%	23,4	6,2	39	15,3	Soft (2)
Displacement	18,9	5,0	58	18,3	Soft (3)
Rinsing	60	21,4	21	27,5	Raw (4)
Total			**133**	**66,0**	

Regenerant waste composition (approx.)	**61,1** (2+3+4)	**33,6** (2+3)	m3
NaCl	8.267	15.038	mg/l
NaNO3	2.142	3.695	mg/l
Na2SO4	3.472	6.316	mg/l
NaHCO3	3.490	6.348	mg/l

DOWEX, MONOSPHERE, MARATHON and UPCORE are trademarks of The Dow Chemical Company.
Cadix Version 6.6.0 — Authorized user: NR - SOREA - Albert Llensa Oliver 0,85

Figura 3.14 *Característiques de la planta d'intercanvi iònic dissenyada pel programa CADIX*

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
NO3	0,1	3	3	3	3	3	3	3	3	4,5	10,5
Cl	484,65	470,11	426,32	391,04	355,75	320,46	302,82	294	285,18	281,65	279,88
SO4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
HCO3	0,1	15	75,793	136,43	197,06	288,01	303,17	318,33	324,39	327,42	324,39

Valors mitjans sortida	
3,6	NO3
353,8	Cl
0,1	SO4
210,0	HCO3

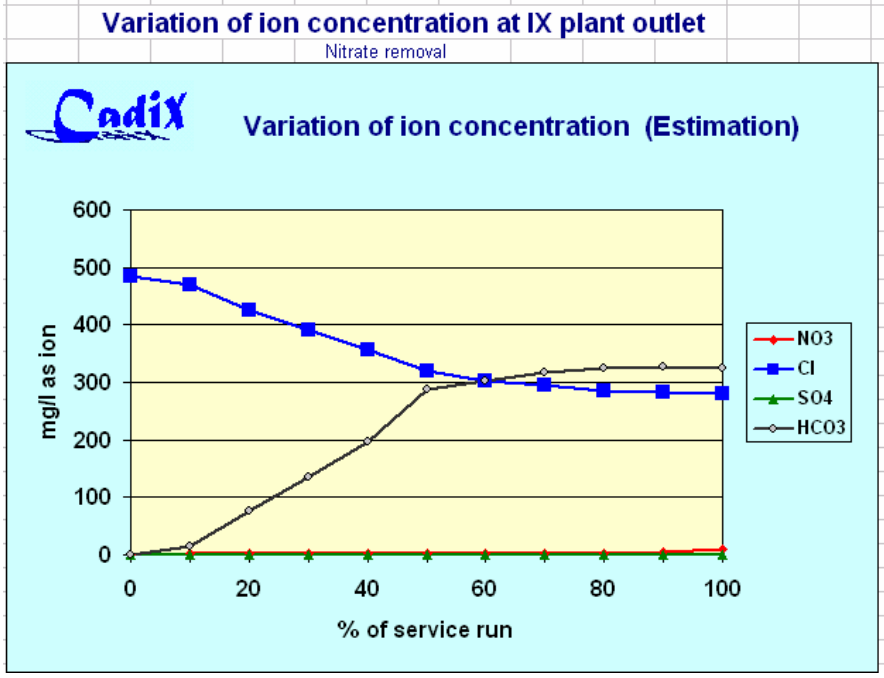


Figura 3.15 Q*ualitat de l'aigua tractada a les resines, segons el programa CADIX*

Mitjançant les dades obtingudes amb la simulació informàtica realitzada amb el programa Cadix, es poden formular les següents conclusions sobre la planta de desnitrificació per intercanvi iònic:

- S'utilitzen 3 resines de 9.200 litres de volum cadascuna. El cabal operacional de cada resina és de 80 m^3/h, de manera que mentres dues resines treballen, la tercera està regenerant-se o en stand-by.

- El període de funcionament de cada resina és de 12 hores, mentres que el període de regeneració + stand-by és de 6 hores.

- Les resines es troben situades dins uns tancs de 2,2 metres de diàmetre i 4,3 metres d'alçada.

- La velocitat lineal de l'aigua al circular a través de la resina és de 21,7 m/h, i la pèrdua de càrrega experimentada és de 76,7 kPa.

- El cabal i la qualitat de l'aigua tractada per les resines és:

  Q = 80 m^3/h·resina · 2 resines · 24h/dia = 3.840 m^3/dia

  $[NO_3^-]$ = 3,6 mg/l $[SO_4^{2-}]$ = 0,1 mg/l

  $[Cl^-]$ = 353,8 mg/l $[HCO_3^-]$ = 210 mg/l

- Cada seqüència de regeneració d'una resina es divideix en tres etapes:

  En la primera etapa es produeix un rentat de la resina, on s'eliminen els sòlids retinguts. La durada d'aquesta primera etapa és de 15 minuts.

  En la segona etapa es porta a terme la regeneració de la resina, mitjançant una dissolució de NaCl al 6 %. La durada d'aquesta segona etapa és de 97 minuts.

  En la tercera etapa es realitza un esbandit, per tal d'eliminar qualsevol excés de dissolució regeneradora que pogués quedar a la resina. Aquesta tercera etapa dura 21 minuts.

- En total, una seqüència de regeneració d'una resina dura 133 minuts, i la quantitat i concentració de l'aigua residual generada és:

Q = 61,1 m^3/resina·regeneració · 3 resines · 1regeneració/18 hores = 10,2 m^3/h

[NaCl] = 8.267 mg/l $[NaNO_3]$ = 2.142 mg/l

$[Na_2SO_4]$ = 3.472 mg/l $[NaHCO_3]$ = 3.490 mg/l

- Per altra banda, el consum d'aigua i NaCl per tal de portar a terme les regeneracions de les resines serà:

$Q_{regenerant}$ = 15,3 m^3/resina·regeneració · 3 resines · 1 regeneració/18hores = 2,55 m^3/h

Consum NaCl = 2.550 l/h · 0,06 kg NaCl/l · 24 h/dia = 3.672 kg NaCl/dia

$Q_{rentat + regeneració + esbandit}$ = 10,2 m^3/h

Consum aigua = 10,2 m^3/h · 24 h/dia = 244,8 m^3/dia

- Com que cada regeneració consumeix 15,3 m^3 de dissolució regeneradora, el dipòsit de preparació on es realitzarà la barreja entre l'aigua i el NaCl, per tal de preparar la dissolució regeneradora, serà de $(15,3 \cdot 1,3) \cong 20$ m^3 de volum, construit en acer inoxidable, i disposarà d'un agitador mecànic de 2 kw de potència, per tal d'aconseguir una barreja complerta del producte.

3.2.3. Post-tractament

❖ **Barreja de l'aigua tractada per les resines i l'aigua by-passada**

Un cop tractada a les resines de bescanvi iònic, l'aigua desnitrificada es barreja amb part d'aigua sense tractar, que by-passa el procés de desnitrificació per intercanvi iònic. D'aquesta manera s'aconsegueixen reduir els costos d'explotació, mantenint el nivell de nitrats en l'aigua subministrada per sota del llindar de 25 ppm NO_3^- recomenat per la Unió Europea (Woodward, 1994).

El volum d'aquest dipòsit serà d'un 10% de la quantitat total d'aigua a tractar diàriament (500 m^3), el material constructiu emprat serà el formigó armat, i es disposarà de dos agitadors mecànics, de 10 kw de potència cadascun, per tal d'aconseguir una barreja complerta de l'aigua a subministrar.

A més, aquest dipòsit de barreja també serveix com a bassa pulmó, per tal de cobrir puntes hidràuliques de demanda.

Tenint en compte que s'han de subministrar 5.000 m^3/dia d'aigua potable, i que les resines de bescanvi iònic tracten 3.840 m^3/dia, la quantitat d'aigua by-passada serà:

$$Q_{\text{by-pass}} = 5.000 - 3.840 = 1.160 \ m^3/\text{dia}$$

Per altra banda, la qualitat de l'aigua potable subministrada serà:

$[NO_3^-] = ((3,6 \cdot 3.840) + (95,1 \cdot 1.160)) / 5000 = 24,8$ mg/l

$[SO_4^{2-}] = ((0,1 \cdot 3.840) + (142,5 \cdot 1.160)) / 5000 = 33,1$ mg/l

$[Cl^-] = ((353,8 \cdot 3.840) + (135,7 \cdot 1.160)) / 5000 = 303,2$ mg/l

$[HCO_3^-] = ((210 \cdot 3.840) + (303,1 \cdot 1.160)) / 5000 = 231,6$ mg/l

$[Na^+] = 62,8$ mg/l $[K^+] = 7$ mg/l $[Mg^{2+}] = 33,5$ mg/l $[Ca^{2+}] = 135,2$ mg/l

Observant els resultats, es pot veure que la concentració dels cations en l'aigua subministrada no ha variat respecte els seus valors inicials en l'aigua subterrània de partida. Aquest fet és degut a que el procés d'intercanvi iònic només disposa de resines aniòniques, i per tant, aquestes interactuen amb els anions, però en canvi, no afecten als cations.

Per altra banda, també és important destacar que la concentració de clorurs en l'aigua subministrada supera els 250 mg/l establerts com a límit al *Real Decreto 140/2003*, on es legisl·la els criteris sanitaris de la qualitat de l'aigua de consum humà a Espanya.

Per evitar aquest problema, i aconseguir que l'aigua subministrada presenti una concentració en clorurs per sota el límit legisl·latiu dels 250 mg/l, s'hauria d'aplicar una mesura correctora basada en realitzar la regeneració de les resines mitjançant dues dissolucions regeneradors (Fletcher et al, 1991).

Primer s'hauria d'aplicar una dissolució de NaCl, dosificant una quantitat propera als 120 gr. NaCl per litre de resina a regenerar. I posteriorment, s'hauria d'aplicar una dissolució de $NaHCO_3$, dosificant uns 17 gr. $NaHCO_3$ per litre de resina a regenerar (Fletcher et al, 1991).

Les dosificacions exactes de cadascun dels dos regenerants s'haurien de determinar mitjançant un estudi experimental, que permetés determinar les concentracions òptimes de treball per aconseguir la màxima eficàcia de regeneració amb el mínim consum de reactius.

Aplicant aquesta doble regeneració, quan la resina torna a entrar en funcionament, s'eviten les concentracions de clorurs tan elevades, provocades pel pic operacional de la primera etapa del cicle de treball, i per tant, es redueix la presència de clorurs a l'aigua tractada, alhora que s'incrementa la presència de bicarbonats.

Però incrementar la presència de bicarbonats a l'aigua tractada no és cap problema, ja que la legisl·lació no marca un límit sobre la presència de bicarbonats en l'aigua de consum humà.

Tot i això, no s'ha pogut comprovar numèricament el nivell d'utilitat d'aquesta mesura correctora, ja que el programa informàtic Cadix no està capacitat per simular regeneracions mitjançant dues dissolucions regeneradores diferents.

❖ Desinfecció de l'aigua a subministrar pel consum humà

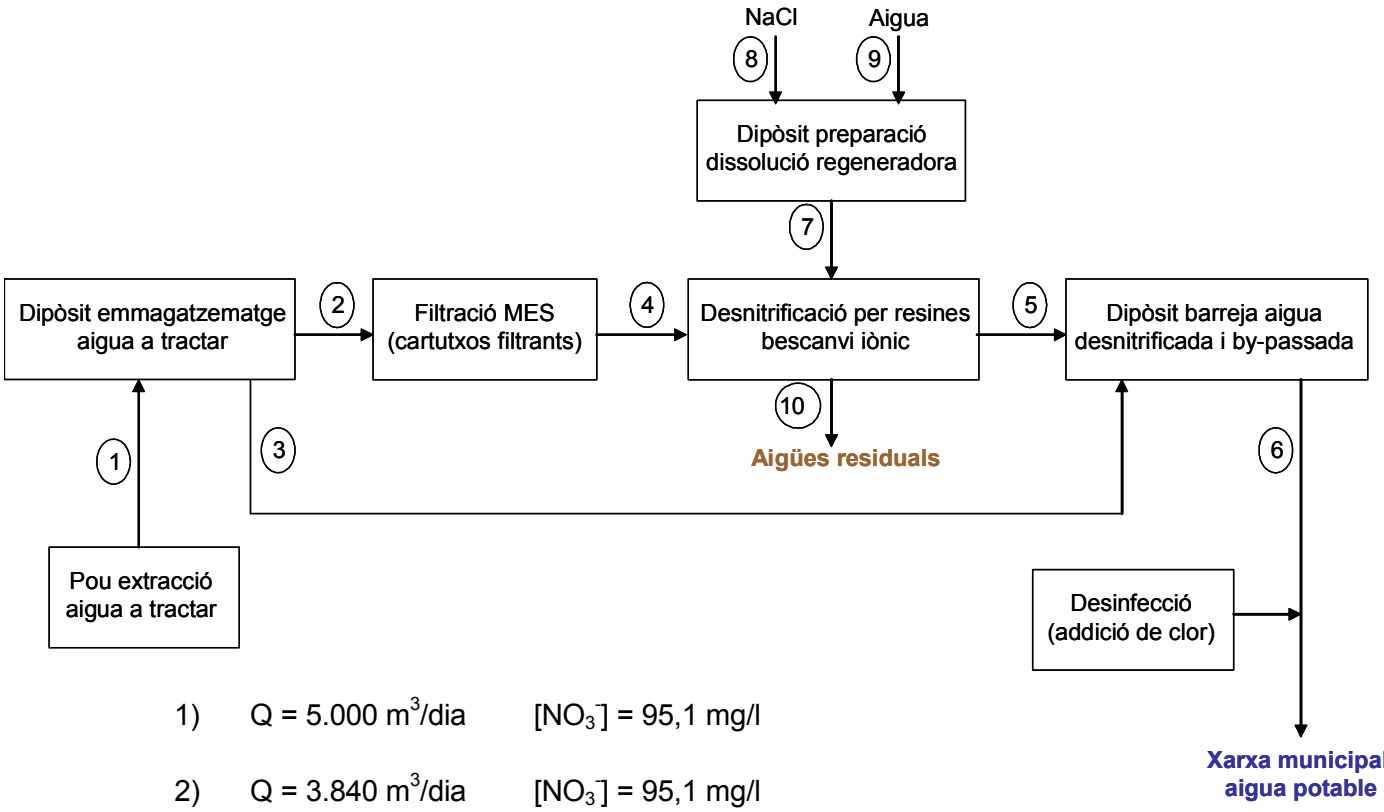
L'últim pas abans d'enviar l'aigua cap a la xarxa municipal d'abastament d'aigua potable és la seva desinfecció, per tal d'eliminar la possible presència de qualsevol tipus de microorganismes patògens.

La desinfecció de l'aigua es realitza amb clor, un agent fortament oxidant, en forma d'hipoclorit sòdic.

Per tal d'aconseguir una correcta desinfecció de l'aigua, s'ha de garantir un temps de retenció mínim d'uns trenta minuts de contacte de l'hipoclorit sòdic amb l'aigua.

A més, l'hipoclorit sòdic no solament elimina els possibles microorganismes patògens que pugui haver-hi a l'aigua, sinó que a més, es dosifica de tal forma que es mantingui una petita quantitat de clor residual a l'aigua subministrada (0,25 – 0,3 mg/l), per tal que serveixi de garantia higiènica fins que aquesta aigua arribi al diferents punts de consum.

3.3. Diagrama de flux de la planta



1) Q = 5.000 m^3/dia $[NO_3^-]$ = 95,1 mg/l

2) Q = 3.840 m^3/dia $[NO_3^-]$ = 95,1 mg/l

3) Q = 1.160 m^3/dia $[NO_3^-]$ = 95,1 mg/l

4) Q = 3.840 m^3/dia $[NO_3^-]$ = 95,1 mg/l [MeS] ≤ 1mg/l

5) Q = 3.840 m^3/dia $[NO_3^-]$ = 3,6 mg/l

6) Q = 5.000 m^3/dia $[NO_3^-]$ = 24,8 mg/l $[Cl^-]$ = 303,2 mg/l

$[SO_4^{2-}]$ = 33,1 mg/l $[HCO_3^-]$ = 231,6 mg/l $[Na^+]$ = 62,8 mg/l

$[K^+]$ = 7 mg/l $[Mg^{2+}]$ = 33,5 mg/l $[Ca^{2+}]$ = 135,2 mg/l

7) Q = 244,8 m^3/dia

8) 3.672 kg NaCl / dia

9) 244,8 m^3/dia

10) Q = 244,8 m^3/dia [NaCl] = 8.267 mg/l $[NaNO_3]$ = 2.142 mg/l

$[Na_2SO_4]$ = 3.472 mg/l $[NaHCO_3]$ = 3.490 mg/l

3.4. Fitxes d'equips

❖ **Pou extracció aigua a potabilitzar**

- Tipus: de tubs clavats
- Profunditat: 50 metres
- Diàmetre interior: 2 metres
- Reixa entrada aigua al pou: 1 metre d'alçada, 2.100 forats/m^2, forats de secció 1,5 cm^2

❖ **Bombes extracció aigua a potabilitzar**

- 2 bombes centrífugues submergibles (1 opera i l'altre de reserva, alterant el seu funcionament de forma automàtica).
- Cabal bombeig: 250 m^3/h
- Alçada manomètrica a superar: 50,5 metres
- Potència de funcionament: 58,5 kw
- Cada bomba disposa d'una vàlvula d'aspiració i una vàlvula d'impulsió.

❖ **Canonada extracció aigua a potabilitzar**

- Material: metàl·lica
- Diàmetre interior: 40 cm.
- Llargada: 50 metres

❖ **Dipòsit emmagatzematge aigua a potabilitzar**

- Material: formigó armat
- Volum: 500 m^3
- Disposa d'una sonda de nivell mínim que activa el bombament del pou, i d'una sonda de nivell màxim que atura el bombament del pou i realitza l'alternància de funcionament entre les dues bombes del pou.

❖ **Filtració MeS aigua a desnitrificar**

- Tipus: filtres de 6 cartutxos de polipropilé bobinat, de 5 μm de selectivitat.
- Disposició: 20 filtres de cartutxos, operant en paral·lel.
- Cada filtre disposa d'un manòmetre de mesura de la pressió diferencial entre l'entrada i la sortida, per tal de controlar l'embrutament dels cartutxos filtrants.

❖ **Resines de bescanvi iònic**

- 3 resines aniòniques, de base forta i tipus I (2 treballen i la tercera està regenerant-se o en stand-by).
- Cabal operacional: 80 m^3/h
- Volum: 9.200 litres
- Període de funcionament: 12 hores
- Període de regeneració + stand-by: 6 hores
- Sistema de regeneració: a contracorrent (funcionament *down flow* i regeneració *up flow*)
- Dissolució regeneradora: NaCl al 6 % (100 gr. NaCl per litre de resina a regenerar)
- Les resines es troben situades dins uns tancs de 2,2 metres de diàmetre i 4,3 metres d'alçada.
- La velocitat lineal de l'aigua al circular a través de la resina és de 21,7 m/h, i la pèrdua de càrrega experimentada és de 76,7 kPa.

❖ **Dipòsit preparació dissolució regeneradora resines**

- Material: acer inoxidable
- Volum: 20 m^3
- Disposa d'un agitador mecànic de 2 kw de potència, per tal d'aconseguir una barreja complerta de la dissolució.

❖ **Dipòsit barreja aigua desnitrificada per resines i aigua by-passada**

- Material: formigó armat
- Volum: 500 m^3
- Disposa de dos agitadors mecànics, de 10 kw de potència cadascun, per tal d'aconseguir una barreja complerta de l'aigua subministrada.

4. Disseny d'una planta d'eliminació de nitrats mitjançant Òsmosi Inversa

4.1. Introducció a la tecnologia

El fenòmen de l'òsmosis, mitjançant el qual l'aigua circula a través d'una membrana semi-permeable, des d'una dissolució diluida cap a una de més concentrada, és àmpliament conegut.

O sigui, si situem dues dissolucions de diferent concentració, separades per una membrana semi-permeable, que permeti el pas de l'aigua però no dels soluts, succeeix que l'aigua avança de la dissolució més diluida cap a la més concentrada, per tal d'igualar la concentració de les dues solucions.

Quan s'ha igualat la concentració de les dissolucions, i per tant, s'ha arribat a l'equilibri termodinàmic, la pressió que la dissolució diluida realitza sobre la membrana s'anomena pressió osmòtica.

Però si per contra, a la dissolució més concentrada se li aplica una pressió superior a aquesta pressió osmòtica, l'aigua comença a circular de la dissolució més concentrada cap a la més diluida, de manera que la diferència de concentració entre les dues dissolucions tendeix a augmentar, en comptes de disminuir. Aquest fenòmen s'anomena òsmosi inversa.

Els conceptes d'òsmosi natural i òsmosi inversa s'han representat a la figura 4.1.

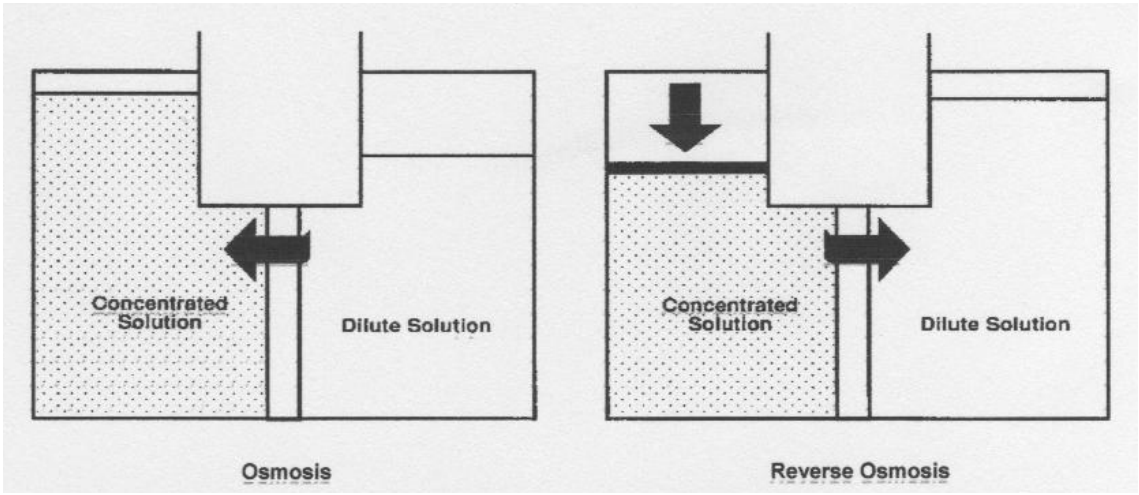


Figura 4.1 *Principi de funcionament de l'òsmosi natural i l'òsmosi inversa*

Llavors, en l'aplicació industrial del fenòmen de l'òsmosi inversa, s'introdueix una corrent d'aigua a tractar a través d'un mòdul de membranes semi-permeables, i llavors es generen dues corrents de sortida. Una de les corrents de sortida presenta una elevada concentració en sals i s'anomena rebuig, mentres que l'altre corrent de sortida presenta una concentració molt baixa de sals, i s'anomena permeat.

En la figura 4.2 es pot observar una representació gràfica dels mòduls industrials de membranes d'òsmosi inversa:

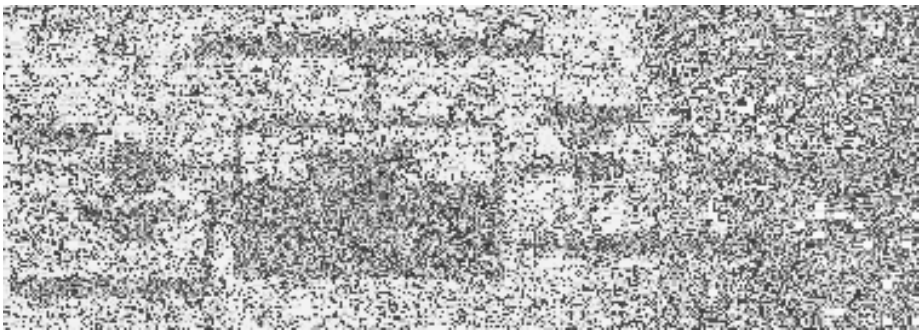


Figura 4.2 *Esquema de funcionament de les membranes industrials d'òsmosi inversa*

Mitjançant una bomba d'elevada pressió, s'injecta la corrent d'aigua a tractar al compartiment d'elevada concentració de sals. Llavors, com que l'aigua a tractar s'ha injectat a elevada pressió, la força que realitza sobre la membrana semi-permeable supera la pressió osmòtica, i gran part de l'aigua avança de la zona d'elevada concentració cap a la zona diluida.

Finalment, mitjançant una vàlvula de regulació es controla el cabal de rebuig que s'extreu del sistema, mentres la resta de cabal que ha entrat al sistema surt en forma de permeat.

El cabal de permeat que surt de la instal·lació és una aigua altament purificada, ja que les membranes d'òsmosi inversa tenen una gran capacitat de retenció de ions, col·loides, matèria orgànica, virus, bacteris, microorganismes, i matèria en suspensió.

En els mòduls industrials, les membranes d'òsmosi inversa estan enrrollades en forma d'espiral, tal i com es mostra a la figura 4.3. Normalment, en cada mòdul o tanc d'òsmosi inversa es situen entre 6 i 8 membranes (Dow Chemical, 2006).

En el cas de l'eliminació de nitrats en aigües subterrànies, es comú situar 6 membranes en cada mòdul o tanc d'òsmosi inversa (Cevaal et al, 1995 ; Filteau i Reilly, 1993).

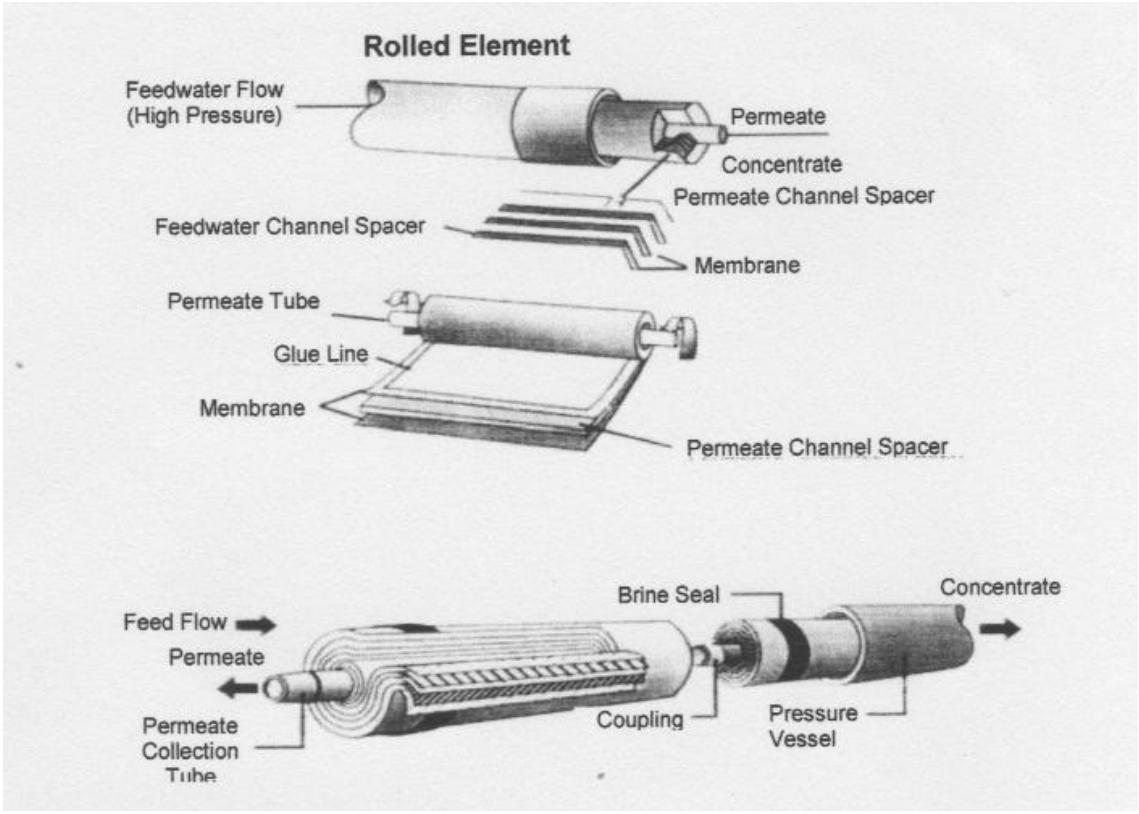


Figura 4.3 M*embranes d'òsmosi inversa en forma d'espiral, dins els mòduls industrials*

També és interessant comentar que les primeres membranes d'òsmosi inversa es fabricaven mitjançant acetat de cel·lulosa, però avui en dia, la tecnologia ha evolucionat, i les membranes actuals estan formades per poliamides. En el cas concret del tractament d'aigües, és molt comú usar poliamides aromàtiques. A la figura 4.4 es pot observar una cadena de poliamida aromàtica, amb els grups funcionals amina i carboxilat (Dow Chemical, 2006).

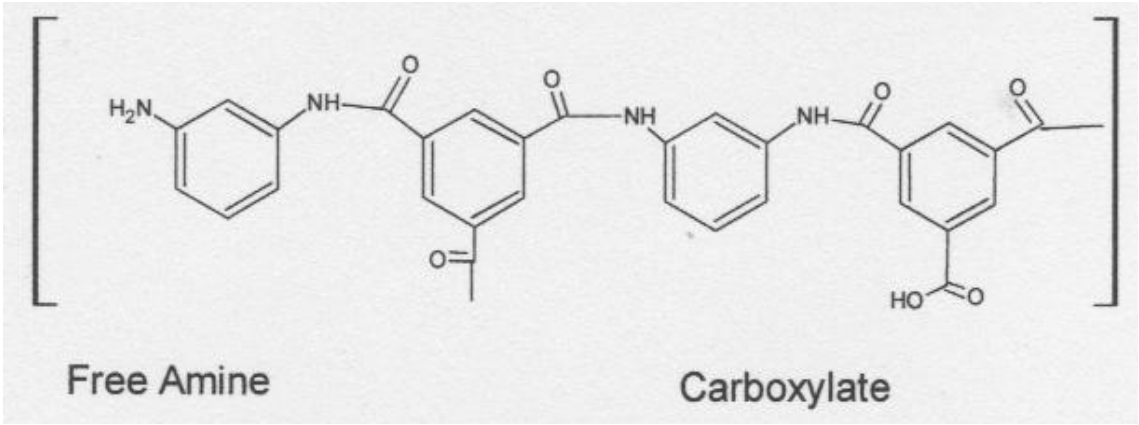


Figura 4.4 *Cadena de poliamida aromàtica, pertanyent a una membrana d'òsmosi inversa*

Els equips d'òsmosi inversa, degut a que l'aigua circula a través seu a elevada pressió, són molt sensibles a la presència de determinats elements, que poden afectar i degradar enormement les membranes. Per això, per tal d'incrementar l'eficiència del procés, i allargar la vida útil de les membranes, el pre-tractament de l'aigua a filtrar és una etapa indispensable.

En el cas d'aigua subterrània poc problemàtica, el pre-tractament es basa en una addició d'àcid i anti-escalant, i una filtració de la matèria en suspensió (Cevaal et al, 1995 ; Dow Chemical, 2006).

En el pre-tractament, l'addició d'àcid evita la precipitació i incrustació de carbonat càlcic a les membranes, mentres que l'addició d'anti-escalant evita la formació i incrustació en les membranes de sals insolubles de calci, magnesi i bari, com per exemple sulfats, fluorurs o fosfats. A més, la filtració de la matèria en suspensió evita que s'obturin fàcilment els poros de les membranes (Cevaal et al, 1995 ; Dow Chemical, 2006)

Per altra banda, un altre concepte important a destacar és el fet que en l'òsmosi inversa no es recupera tota l'aigua tractada, sinó que es genera un rebuig de forma continuada. Quan es treballa amb l'eliminació de nitrats en aigües subterrànies, normalment s'estableixen percentatges de recuperació situats entre el 80 i el 85 % de l'aigua tractada (Cevaal et al, 1995 ; Filteau i Reilly, 1993).

Llavors, per aconseguir aquests percentatges de recuperació situats entre el 80 i el 85 % de l'aigua tractada, la disposició de les membranes d'òsmosi inversa normalment s'estructura en dues etapes en sèrie, situant 2/3 parts del total de membranes en la primera etapa, i la tercera part restant de les membranes en la segona etapa (Cevaal et al, 1995 ; Passanisi et al, 2000 ; Dow Chemical, 2006).

4.2. Descripció del procés

4.2.1. Pre-tractament

❖ **Extracció de l'aigua a potabilitzar**

L'extracció de l'aigua subterrània es realitzarà de la mateixa forma que s'ha comentat en el capítol anterior pel procés d'intercanvi iònic (pàgines 60 a 64). És per això que alguns conceptes d'aquest sub-apartat (com el disseny del pou, el càlcul de la pèrdua de càrrega de l'aigua extreta a través de la canonada d'impulsió, o la determinació de la potència necessària per les bombes hidràuliques) s'han simplificat, per tal de facilitar la lectura del document.

Si es desitja consultar el procés complert de disseny del sistema d'extracció d'aigua a potabilitzar, només cal consultar les pàgines 60 a 64 d'aquesta memòria, on apareixen tots els càlculs de forma detallada, per la planta d'intercanvi iònic.

Tot i això, la capacitat d'extracció d'aigua de les bombes serà de 300 m^3/h, en comptes dels 250 m^3/h del procés d'intercanvi iònic. Això és degut al fet que en el procés d'intercanvi iònic, tota l'aigua que circula a través de les resines és aprofitada pel consum humà. En canvi, en el procés d'òsmosi inversa, com ja s'ha comentat en l'apartat anterior, una part de l'aigua que circula per les membranes no es pot aprofitar, i s'anomena rebuig.

O sigui, en el procés d'intercanvi iònic, el percentatge de recuperació d'aigua tractada per les resines és del 100 %, mentres que en el procés d'òsmosi inversa, el percentatge de recuperació d'aigua tractada per les membranes és del 80 %.

Llavors, per tal d'obtenir 3.800 m^3/dia d'aigua desnitrificada, les resines de bescanvi iònic han de tractar 3.800 m^3/dia, i en canvi, les membranes d'òsmosi inversa han de tractar 4.750 m^3/dia.

Per això, el cabal total d'aigua a tractar en el procés d'òsmosi inversa és de 5.950 m^3/dia, en comptes dels 5.000 m^3/dia del procés d'intercanvi iònic. I en conseqüència, s'ha decidit incrementar la capacitat d'extracció d'aigua de les bombes, dels 250 fins als 300 m^3/h.

Tenint en compte això, es disposarà d'un pou d'uns 50 metres de profunditat, construit mitjançant el mètode de *tubs clavats*.

L'entrada d'aigua a l'interior del pou es realitzarà mitjançant una reixa a la seva part inferior, en contacte amb l'aqüífer. Aquesta reixa d'entrada d'aigua presentarà una densitat de

2.100 forats/m^2 tub. I la secció de cadascun dels forats serà de 1,5 cm^2, superfície suficientment petita per evitar que entri sorra i grava a l'interior del pou.

L'altura de la reixa d'entrada d'aigua serà de 1 metre, i el diàmetre interior del pou de 2 metres.

Per altra banda, la instal·lació d'extracció d'aigua del pou estarà formada per:

- 2 bombes centrífugues submergibles, una en operació i l'altre de reserva. Per tal que cap de les dues bombes no estigui massa temps aturada, el seu funcionament s'anirà alterant mitjançant una maniobra elèctrica automatitzada. Aquestes bombes han de tenir una potència d'uns 70 Kw, i el seu punt de treball estarà situat en un cabal de 300 m^3/h i una alçada manomètrica total de 50,5 metres.
- 1 vàlvula d'aspiració i 1 vàlvula d'impulsió per cadascuna de les dues bombes hidràuliques. Aquestes vàlvules permetran aïllar les bombes de la resta de la instal·lació, per quan sigui necessari extreure-les per tal de realitzar-hi tasques de manteniment.
- Una canonada metàl·lica d'impulsió d'aigua per cadascuna de les dues bombes hidràuliques. Les canonades mesuraran uns 50 metres de llargada i tindran un diàmetre interior de 40 cm.

❖ **Emmagatzematge de l'aigua a tractar**

Un cop s'ha extret l'aigua a potabilitzar del pou, aquesta s'emmagatzema en un dipòsit de regulació, que serveix de bassa pulmó per cobrir puntes hidràuliques de demanda. El volum d'aquest dipòsit serà d'un 10% de la quantitat total d'aigua a subministrar diàriament (500 m^3), i el material constructiu emprat serà el formigó armat.

A més, aquest dipòsit de regulació també serveix per realitzar el repartiment entre l'aigua que es tracta a les membranes d'òsmosi inversa i la que es by-passa directament cap al final del procés de desnitrificació.

O sigui, com que l'aigua tractada a les membranes d'òsmosi inversa presenta una concentració en nitrats quasi nul·la ($\cong$ 3 mg/l), es pot barrejar amb una part d'aigua no tractada, fins assolir el valor desitjat de 25 mg/l de NO_3^- a l'aigua de sortida. D'aquesta manera s'aconsegueixen reduir els costos d'explotació, mantenint el nivell de nitrats en l'aigua subministrada en el valor recomenat per la Unió Europea (Cevaal et al, 1995 ; Filteau i Reilly, 1993).

Llavors, tal i com ja s'ha determinat en el capítol anterior pel procés d'intercanvi iònic (pàgines 64 a 65), el cabal d'aigua que s'ha d'obtenir a l'etapa de desnitrificació (basada en membranes d'òsmosi inversa en aquest cas) és de 3.800 m^3/dia, i el cabal d'aigua que es pot by-passar cap al final del procés de desnitrificació és de 1.200 m^3/dia.

Per altra banda, també és important comentar que aquest dipòsit tindrà instal·lades dues sondes de nivell, una de nivell mínim i l'altre de nivell màxim. Quan el contingut del dipòsit disminueixi per sota la sonda de nivell mínim, la senyal generada per aquesta sonda, mitjançant un automatisme elèctric, posarà en funcionament una de les dues bombes d'extracció d'aigua del pou, per tal de tornar a emplenar el dipòsit.

Per contra, quan el contingut del dipòsit superi la sonda de nivell màxim, la senyal generada per aquesta sonda, mitjançant un automatisme elèctric, aturarà el funcionament de la bomba hidràulica del pou que en aquell moment estigui en marxa. A més, aquest automatisme elèctric d'aturada del bombament, també serà l'encarregat de realitzar l'alternància de funcionament entre les dues bombes del pou, mitjançant un relé elèctric.

D'aquesta manera, quan la sonda de nivell mínim torni a activar el bombament del pou, la bomba que es posarà en marxa serà la que restava aturada l'últim cop que s'havia extret aigua del pou.

❖ **Addició de reactius químics**

Els equips d'òsmosi inversa, degut a que l'aigua circula a través seu a elevada pressió, són molt sensibles a la presència de determinats elements, que poden afectar i degradar enormement les membranes.

Per això, per tal d'incrementar l'eficiència del procés, i allargar la vida útil de les membranes, l'addició de determinats reactius químics que ajustin i corregeixin les característiques de l'aigua a tractar, és indispensable.

L'addició de reactius químics es pot dividir en tres parts:

- Addició de bisulfit sòdic: Les membranes d'òsmosi inversa són molt sensibles a les substàncies oxidants, com per exemple l'oxígen o el clor. Per això, mitjançant l'addició de bisulfit sòdic es disminueix el caràcter oxidant de l'aigua, i s'evita una oxidació prematura de les membranes. Tot i això, les aigües subterrànies normalment no presenten un elevat poder oxidant, i per tant, en condicions normals no serà necessari addicionar bisulfit sòdic. Però per tal de poder actuar en cas necessari, es disposarà d'un equip de dosificació de bisulfit sòdic, controlat per una sonda de mesura de potencial Redox. Aquesta sonda mesurarà les condicions

oxidants/reductores de l'aigua a tractar, i en cas de detectar un potencial oxidant excessivament elevat, activarà la dosificació de bisulfit sòdic (Passanisi et al, 2000).

- Addició d'àcid: Mitjançant l'acidificació de l'aigua a tractar, s'aconsegueix mantenir l'equilibri bicarbonats/carbonats desplaçat cap als bicarbonats, de manera que s'evita la precipitació i incrustació de carbonat càlcic en les membranes. Per tal d'acidificar l'aigua és preferible utilitzar l'àcid sulfúric en front l'àcid clorhídric. Això és degut a que l'àcid sulfúric és més barat, i per altra banda, la utilització d'àcid clorhídric podria aportar ions clorur a l'aigua, que incrementarien el seu potencial oxidant. És comú addicionar uns 30 mg/l d'àcid sulfúric, per aconseguir que l'SDI (Stiff & Davis Index) del corrent concentrat o de rebuig no superi el valor de 1,5 (Cevaal et al, 1995 ; Filteau i Reilly, 1993).

- Addició d'anti-escalants: Els anti-escalants són inhibidors comercials de precipitació, que eviten la formació i incrustació en les membranes de sals insolubles de calci, magnesi i bari, com per exemple sulfats, fluorurs o fosfats. Existeixen tres tipus d'anti-escalants: hexametafosfat de sodi, compostos organofosfonats i compostos poli-acrílics. És comú addicionar uns 2 – 3,5 mg/l d'anti-escalants en aigües no massa problemàtiques, com són les aigües subterrànies (Cevaal et al, 1995 ; Filteau i Reilly, 1993).

❖ **Filtració de la matèria en suspensió**

L'aigua que arriba a les membranes d'òsmosi inversa no pot presentar un contingut elevat en partícules en suspensió o en col·loides, ja que sinó aquests obturarien fàcilment els poros de les membranes, fent-les malbé. Els fabricants de membranes recomanen que l'aigua d'entrada no presenti una concentració en MeS superior a 1 mg/l (Dow Chemical, 2006).

Per això, prèviament a les membranes d'òsmosi inversa, l'aigua a desnitrificar es fa circular a través d'uns filtres de cartutxos, que retenen la matèria en suspensió.

Cadascun d'aquests filtres, conté al seu interior 6 cartutxos filtrants, els quals són de polipropilè bobinat i presenten una selectivitat de 5 μm, de manera que retenen les partícules en suspensió i els col·loides de tamany superior a 5 μm.

Es situaran 20 filtres de cartutxos, operant en paral·lel. Tenint en compte que la capacitat de filtració de cadascun d'ells es situa al voltant dels 15 m^3/h, la capacitat total de filtració de la MeS en el pre-tractament de la planta serà de (20 · 15 · 24) = 7.200 m^3/dia.

L'etapa de filtració de la MeS és un pas essencial pel correcte funcionament de tota la planta, i en conseqüència, ha d'operar en continu i correctament.

Llavors, per tal d'assegurar aquest funcionament correcte i continuat de l'etapa de filtració de la MeS, és molt important portar a terme un manteniment adequat dels filtres de cartutxos.

I per aconseguir desenvolupar aquest manteniment adequat dels filtres de cartutxos, aquests s'han d'aturar de forma periòdica, per tal de revisar-los i netejar-los.

És per això que s'ha decidit sobredimensionar l'etapa de filtració de la MeS (capacitat de 7.200 m^3/h), ja que així es podran desenvolupar sense problemes les tasques de manteniment dels filtres.

Per tal de controlar l'evolució del funcionament dels filtres, s'ha d'instal·lar un manòmetre de pressió diferencial a cada filtre, que prengui valors de pressió a l'entrada i la sortida del filtre.

Quan el valor marcat pel manòmetre és superior a 1 bar, els cartutxos filtrants que hi ha a l'interior del filtre s'han de netejar amb una dissolució d'hipoclorit sòdic al 15 %, durant un període de temps comprés entre 45 i 55 minuts, i després ja es poden retornar al filtre.

Però si després de realitzar aquesta operació de neteja, el manòmetre encara marca una diferència de pressió entre l'entrada i la sortida del filtre, superior a 1 bar, els cartutxos filtrants ja no es poden reutilitzar, i s'han de canviar per uns de nous.

4.2.2. Eliminació de nitrats mitjançant òsmosi inversa

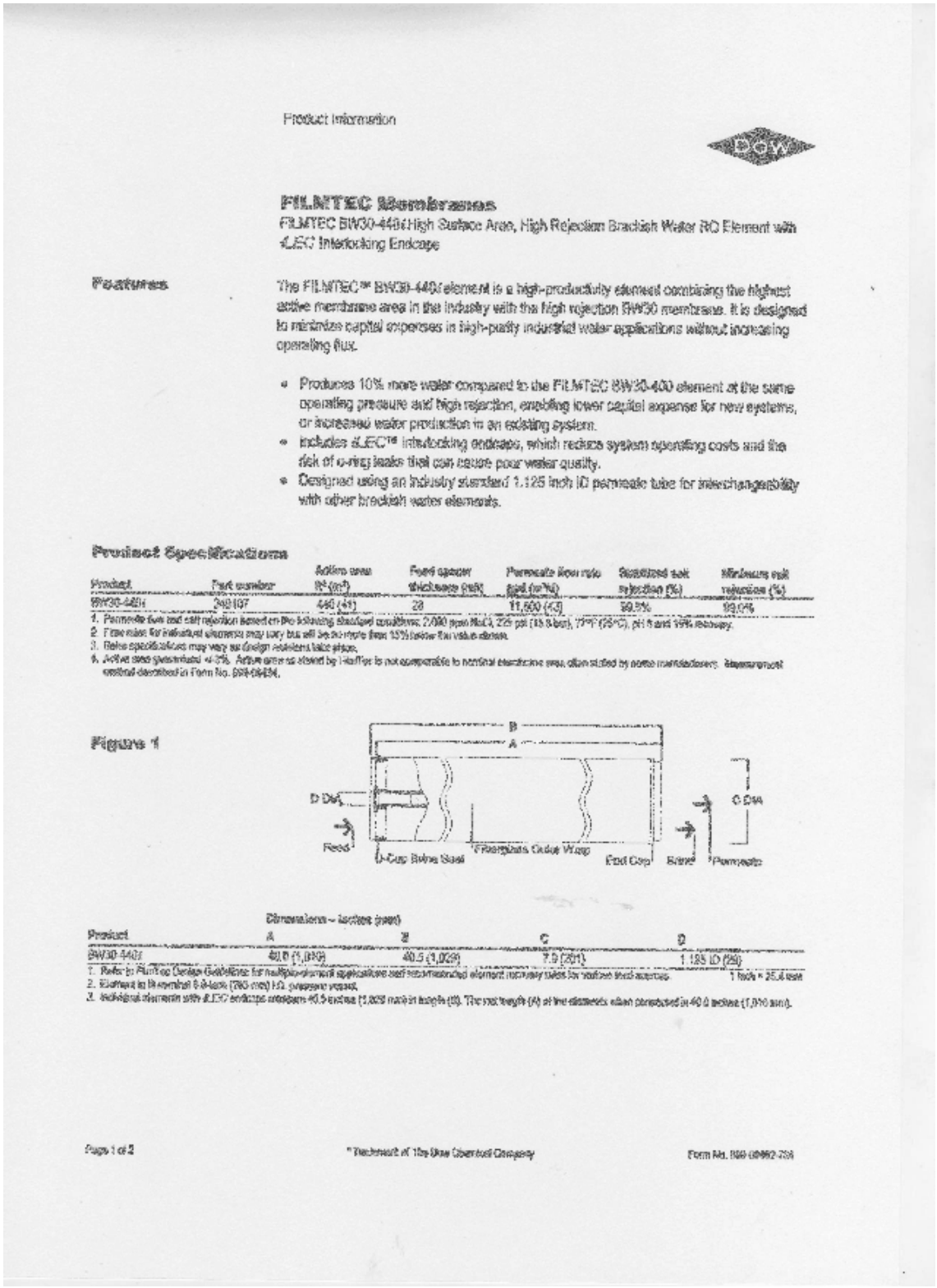
❖ **Membranes d'òsmosi inversa**

La desnitrificació mitjançant òsmosi inversa es realitzarà amb una configuració de treball del sistema d'un únic pas, sense recircul·lacions. Les recircul·lacions només s'apliquen quan es volen aconseguir percentatges de recuperació molt elevats en plantes petites. Però en canvi, en plantes grans (com és el nostre cas) s'acostuma a treballar amb un sistema d'un únic pas, tipus flux-pistó (Dow Chemical, 2006).

El percentatge de recuperació d'aigua tractada s'estableix en un 80 %, que és un valor força comú quan es treballa amb desnitrificació d'aigües subterrànies (Cevaal et al, 1995 ; Filteau i Reilly, 1993).

Per tal de realitzar el disseny del procés de desnitrificació, s'adoptaran els paràmetres operacionals de les membranes tipus Filmtec BW 30-440i, de l'empresa Dow Chemical. Aquest tipus de membranes són recomenades per la producció d'aigua potable en sistemes d'abastament municipal, per aigües no excessivament problemàtiques, com són les aigües subterrànies.

A la figura 4.5 es pot observar les característiques tècniques de les membranes tipus Filmtec BW 30-440i.



Product Information

DOW

FILMTEC Membranes

FILMTEC BW30-440i High Surface Area, High Rejection Brackish Water RO Element with iLEC Interlocking Endcaps

Features

The FILMTEC™ BW30-440i element is a high-productivity element combining the highest active membrane area in the industry with the high rejection BW30 membrane. It is designed to minimize capital expenses in high-purity industrial water applications without increasing operating flux.

- Produces 10% more water compared to the FILMTEC BW30-400 element at the same operating pressure and high rejection, enabling lower capital expense for new systems, or increased water production in an existing system.
- Includes iLEC™ interlocking endcaps, which reduce system operating costs and the risk of o-ring leaks that can cause poor water quality.
- Designed using an industry standard 1.125 inch ID permeate tube for interchangeability with other brackish water elements.

Product Specifications

Product	Part number	Active area ft² (m²)	Feed spacer thickness (mil)	Permeate flow rate gpd (m³/d)	Stabilized salt rejection (%)	Minimum salt rejection (%)
BW30-440i	340197	440 (41)	28	11,600 (43)	99.5%	99.0%

1. Permeate flow and salt rejection based on the following standard conditions: 2,000 ppm NaCl, 225 psi (15.5 bar), 77°F (25°C), pH 8 and 15% recovery.
2. Flow rates for individual elements may vary but will be no more than 15% below the value shown.
3. Below specifications may vary as design revisions take place.
4. Active area guaranteed +/-5%. Active area as stated by Hydranautics is not comparable to nominal membrane area often stated by some manufacturers. Measurement method described in Form No. 609-00434.

Figure 1

Product	Dimensions – inches (mm) A	B	C	D
BW30-440i	40.0 (1,016)	40.5 (1,029)	7.9 (201)	1.125 ID (29)

1. Refer to FilmTec Design Guidelines for multiple-element applications and recommended element recovery rates for various feed sources. 1 inch = 25.4 mm
2. Element is the nominal 8-inch (203 mm) I.D. pressure vessel.
3. Individual elements with iLEC endcaps measure 40.5 inches (1,029 mm) in length (B). The net length (A) of the elements when connected is 40.0 inches (1,016 mm).

™Trademark of The Dow Chemical Company

Figura 4.5 *Característiques tècniques de les membranes Filmtec BW 30-440i*

Les membranes Filmtec BW 30-440i es situen dins uns mòduls operacionals de 203 mm de diàmetre. El flux de disseny de l'aigua a través d'aquestes membranes es situa en 32 $l/m^2 \cdot h$, i la superfície de contacte de cadascun dels elements filtrants és de 40,9 m^2.

Llavors, tenint en compte que el cabal d'aigua a obtenir són 3.800 m^3/dia, el número total d'elements filtrants necessaris serà:

$$\text{Número total elements filtrants} = (3.800\ m^3/\text{dia} \cdot 41{,}67\ l/h/m^3/\text{dia}) / (40{,}9\ m^2 \cdot 32\ l/m^2 \cdot h) =$$

$$= 120 \text{ elements}$$

Si en cada tanc o mòdul d'òsmosi inversa es situen 6 elements filtrants, disseny estàndard per la majoria d'equips d'òsmosi inversa en desnitrificació d'aigües subterrànies (Cevaal et al, 1995 ; Filteau i Reilly, 1993), el número total de tancs necessaris serà:

$$\text{Número total tancs} = 120 / 6 = 20 \text{ tancs}$$

Segons els criteris de disseny recomenats per la companyia Dow Chemical, quan es treballa amb una configuració de 6 elements filtrants per tanc, i un percentatge de recuperació d'aigua tractada del 80 %, el procés d'òsmosi inversa s'ha d'estructurar en dues etapes en sèrie, amb una ràtio de tancs per etapa de 2:1.

Seguint aquests criteris (Dow Chemical, 2006), el procés de desnitrificació s'estructurarà de la següent manera:

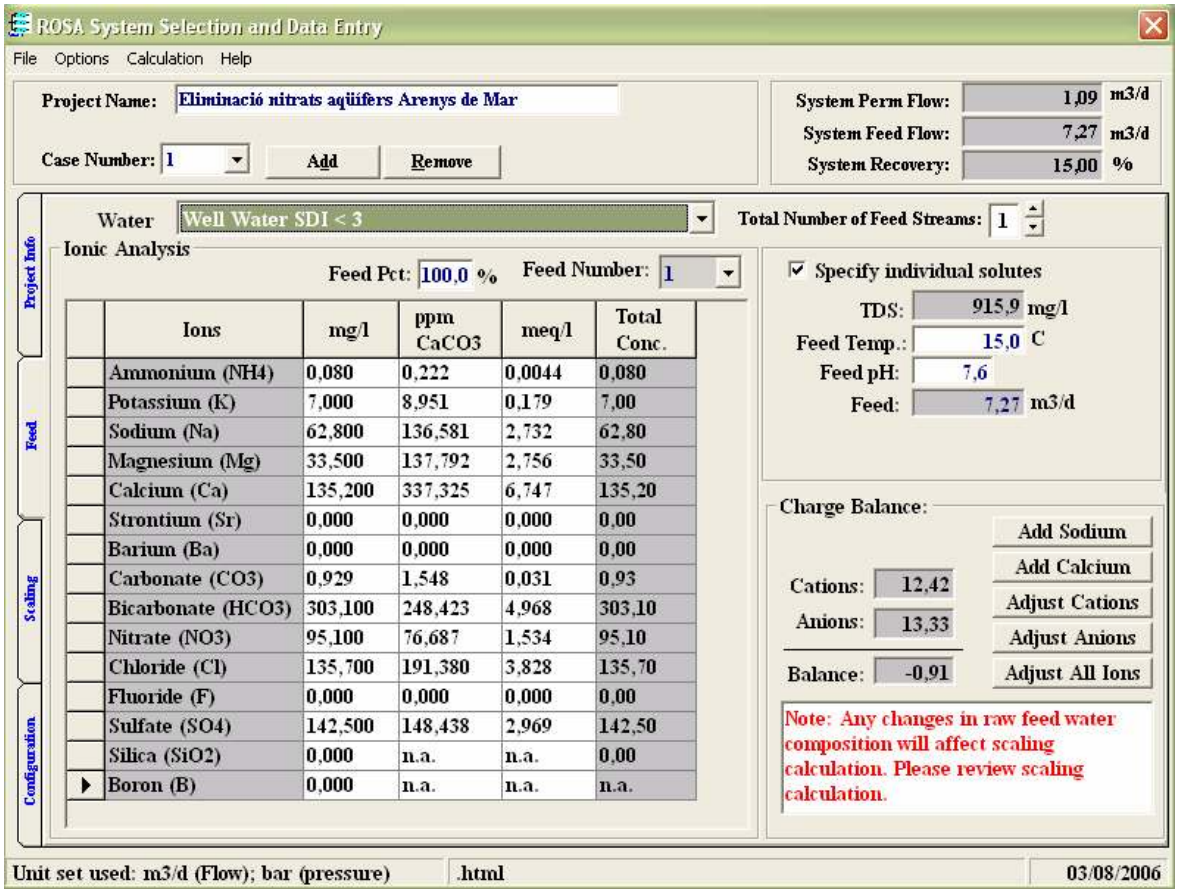
1a etapa: 13 tancs de 6 elements filtrants

2a etapa: 7 tancs de 6 elements filtrants

Per tal de comprovar el correcte funcionament del sistema dissenyat, i observar el comportament global del procés de desnitrificació per membranes d'òsmosi inversa, s'ha simulat la instal·lació mitjançant el software informàtic Rosa, un programa de simulació de processos d'òsmosi inversa, creat i patentat per l'empresa Dow Chemical.

Seguidament es mostren, de forma gràfica, els diversos passos que s'han anat seguint dins el programa Rosa, per tal de simular el funcionament del procés d'òsmosi inversa dissenyat.

Primer de tot, tal i com es pot observar en la figura 4.6, s'ha introduit la caracterització físico-química de l'aigua a tractar.



Ions	mg/l	ppm CaCO3	meq/l	Total Conc.
Ammonium (NH4)	0,080	0,222	0,0044	0,080
Potassium (K)	7,000	8,951	0,179	7,00
Sodium (Na)	62,800	136,581	2,732	62,80
Magnesium (Mg)	33,500	137,792	2,756	33,50
Calcium (Ca)	135,200	337,325	6,747	135,20
Strontium (Sr)	0,000	0,000	0,000	0,00
Barium (Ba)	0,000	0,000	0,000	0,00
Carbonate (CO3)	0,929	1,548	0,031	0,93
Bicarbonate (HCO3)	303,100	248,423	4,968	303,10
Nitrate (NO3)	95,100	76,687	1,534	95,10
Chloride (Cl)	135,700	191,380	3,828	135,70
Fluoride (F)	0,000	0,000	0,000	0,00
Sulfate (SO4)	142,500	148,438	2,969	142,50
Silica (SiO2)	0,000	n.a.	n.a.	0,00
Boron (B)	0,000	n.a.	n.a.	n.a.

Figura 4.6 *Caracterització físico-química de l'aigua a tractar, al programa ROSA*

En el segon pas, s'estableix el percentatge de recuperació d'aigua tractada del sistema, i en funció d'aquest, es decideix el pre-tractament a aplicar. En el nostre cas, tal i com es pot observar en la figura 4.7, s'ha decidit treballar amb un percentatge de recuperació del 80%, i dosificant àcid sulfúric fins ajustar el ph de l'aigua d'entrada a un valor de 7.

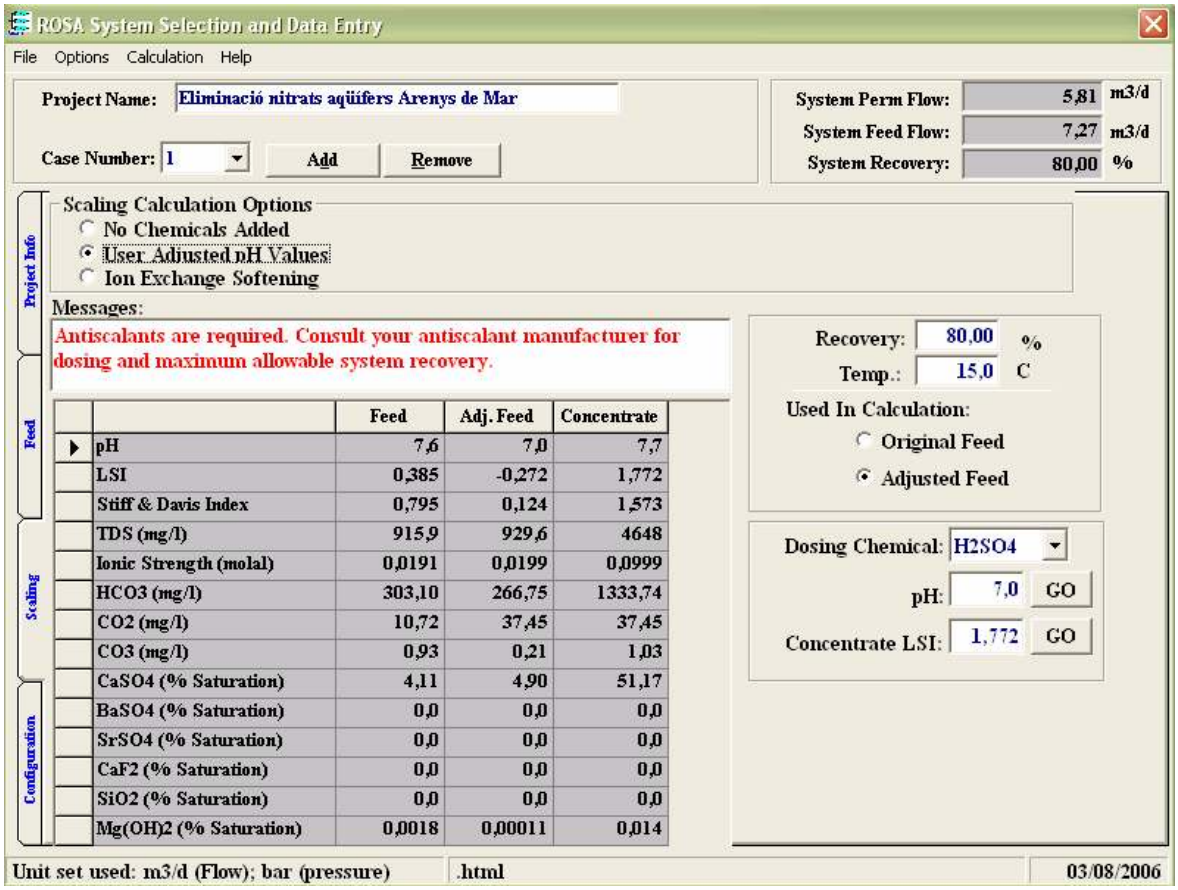


Figura 4.7 *Elecció del percentatge de recuperació i el pre-tractament, al programa ROSA*

Finalment, el tercer i últim pas consisteix en determinar els cabals operacionals i la disposició estructural de les membranes. En el nostre cas, tal i com es pot veure a la figura 4.8, s'ha establert un cabal d'entrada a membranes de 4.750 m^3/dia, i un cabal de by-pass de 1.200 m^3/dia. A més, el procés d'òsmosi inversa s'ha estructurat en dues etapes en sèrie, de manera que en la primera etapa s'han situat 13 tancs de 6 elements filtrants cadascun, i en la segona etapa s'han situat 7 tancs de 6 elements filtrants cadascun. Com a elements filtrants s'han escollit les membranes Filmtec BW 30 – 440i.

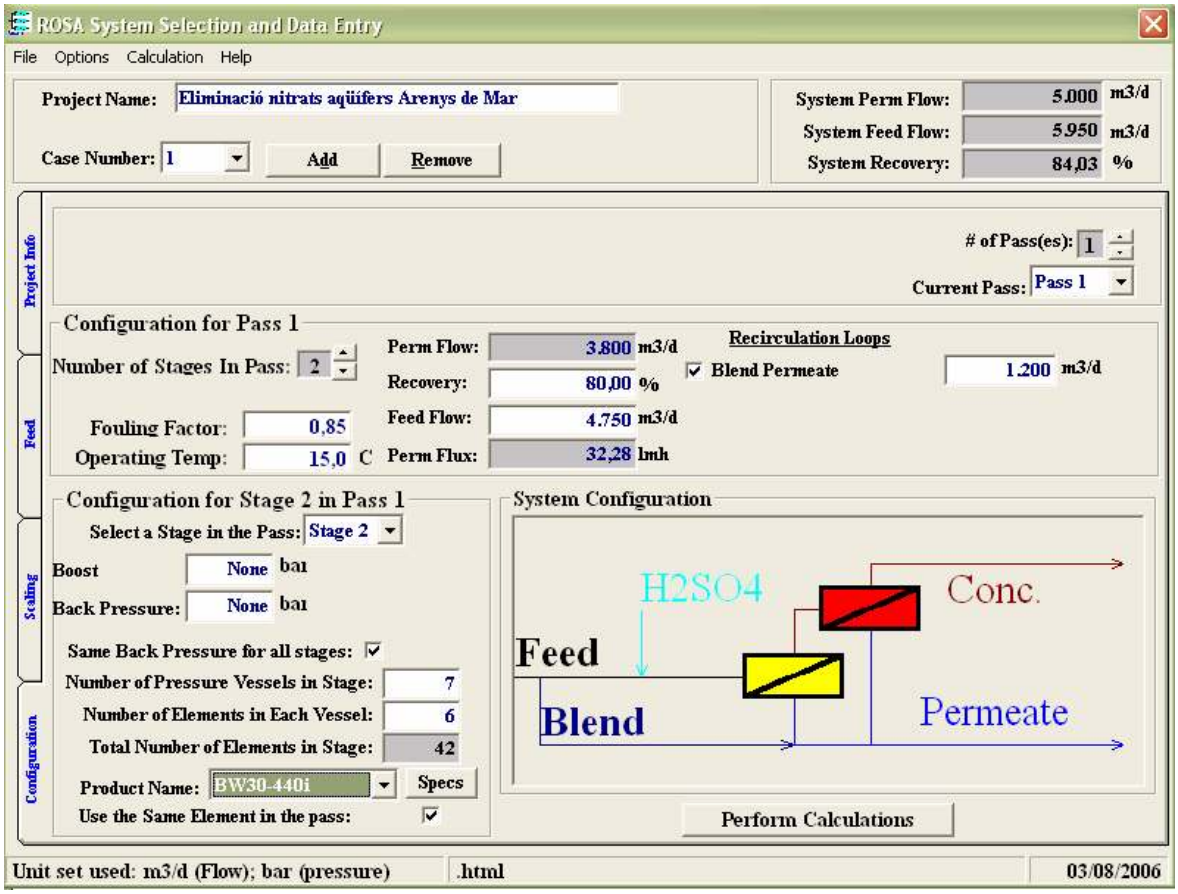


Figura 4.8 *Cabals operacionals i disposició estructural de les membranes, al programa ROSA*

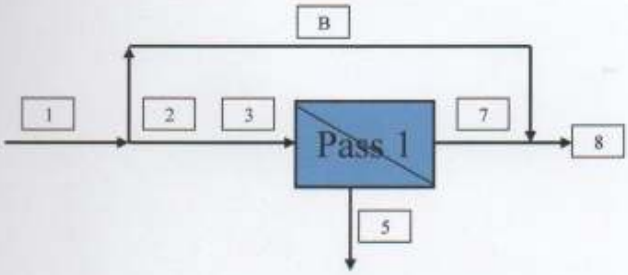
Llavors, els resultats obtinguts mitjançant la simulació informàtica es poden observar a les figures 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 i 4.13, on es mostren els informes generats pel programa un cop finalitzada la simulació.

ROSA report Página 1 de 2

Project: Nitrate removal
Prepared By: Albert Llensa Oliver
Propietari

ROSA v6.0 ConfigDB 35240039
Case: 1
29/01/2006

System Design Overview

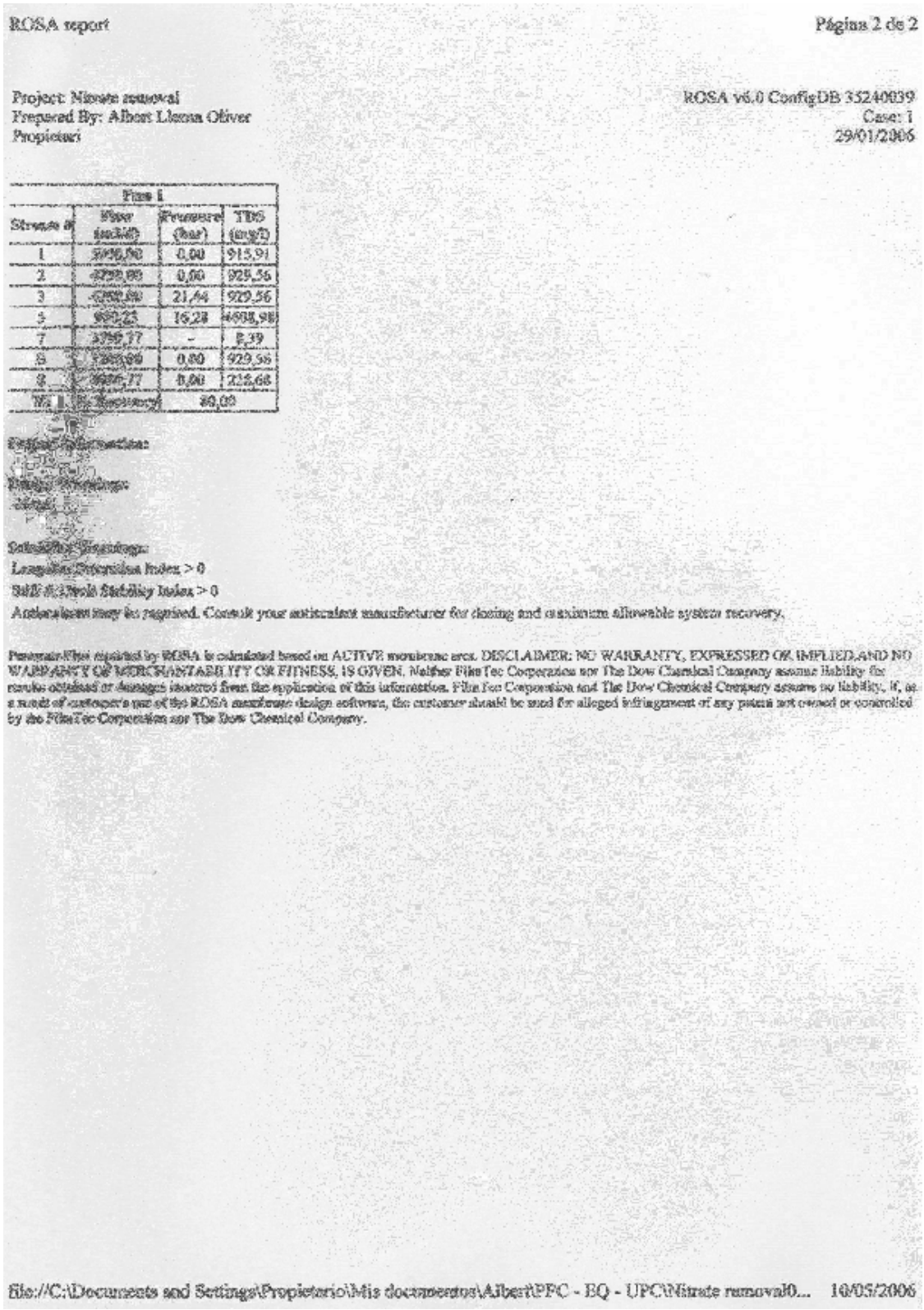


Raw Water TDS	915,91 mg/l	% System Recovery (8/1)	84,03 %
Water Classification	Well Water SDI < 3	Fouling Factor (Pass 1)	0,85
Feed Temperature	15,0 C		

Pass #	Pass 1	
Stage #	1	2
Element Type	BW30-440i	BW30-440i
Pressure Vessels per Stage	13	7
Elements per Pressure Vessel	6	6
Total Number of Elements	78	42
Pass Average Flux	32,28 lmh	
Stage Average Flux	34,09 lmh	28,92 lmh
Permeate Back Pressure	0,00 bar	0,00 bar
Booster Pressure	0,00 bar	0,00 bar
Chemical Dose	-	
Energy Consumption	0,71 kWh/m3	

Permeate Flux reported by ROSA is calculated based on ACTIVE membrane area. DISCLAIMER: NO WARRANTY, EXPRESSED OR IMPLIED,AND NO WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS, IS GIVEN. Neither FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company assume liability for results obtained or damages incurred from the application of this information. FilmTec Corporation and The Dow Chemical Company assume no liability, if, as a result of customer's use of the ROSA membrane design software, the customer should be sued for alleged infringement of any patent not owned or controlled by the FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company.

Figura 4.9 *Característiques de la planta d'òsmosi inversa dissenyada pel programa ROSA*



ROSA report Página 2 de 2

Project: Nitrate removal
Prepared By: Albert Llensa Oliver
Propietari

ROSA v6.0 ConfigDB 35240039
Case: 1
29/01/2006

Fine 1			
Stream #	Flow (m3/d)	Pressure (bar)	TDS (mg/l)
1	[illegible]	0,00	915,91
2	[illegible]	0,00	929,56
3	[illegible]	21,44	929,56
5	[illegible]	16,28	[illegible]
7	[illegible]	-	8,39
8	[illegible]	0,00	929,56
9	[illegible]	0,00	[illegible]
Wt. % Recovery		80,00	

Project Information:

Design Warnings:

Scaling Warnings:
Langelier Saturation Index > 0
Stiff & Davis Stability Index > 0
Antiscalant may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

Pressure-Flow repaired by ROSA is calculated based on ACTIVE membrane area. DISCLAIMER: NO WARRANTY, EXPRESSED OR IMPLIED, AND NO WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS, IS GIVEN. Neither FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company assume liability for results obtained or damages incurred from the application of this information. FilmTec Corporation and The Dow Chemical Company assume no liability, if, as a result of customer's use of the ROSA membrane design software, the customer should be sued for alleged infringement of any patent not owned or controlled by the FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company.

file://C:\Documents and Settings\Propietario\Mis documentos\Albert\PFC - EQ - UPC\Nitrate removal0... 10/05/2006

Figura 4.10 *Característiques de la planta d'òsmosi inversa dissenyada pel programa ROSA*

ROSA Detailed Report Página 1 de 3

Reverse Osmosis System Analysis for FILMTEC™ Membranes ROSA v6.0 ConfigDB 35240039
Project: Nitrate removal Case: 1
Albert Llanas Oliva, Propietari 29/01/2006

Project Information

System Details

Feed Flow to Stage 1	4750,00 m3/d	Pass 1 Permeate Flow	3799,77 m3/d	Osmotic Pressure	
Raw Water Flow to System	5950,00 m3/d	Pass 1 Recovery	80,00 %	Feed	0,44 bar
Feed Pressure	21,44 bar	Feed Temperature	15,0 C	Concentrate	2,04 bar
Fouling Factor	0,85	Feed TDS	929,56 mg/l	Average	1,24 bar
Chem. Dose (H2SO4)	30,38 mg/l	Number of Elements	120	Average NDP	17,95 bar
Total Active Area	4905,12 M2	Average Pass 1 Flux	32,28 lmh	Power	147,37 kW
Water Classification: Well Water SDI < 5		Bypass Blending Flow	1200,00 m3/d	Specific Energy	0,71 kWh/m3
System Recovery	84,03 %	Total Blended Product	4999,77 m3/d		

Stage	Element	PV	#Ele	Feed Flow (m3/d)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m3/d)	Conc Flow (m3/d)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m3/d)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	BW30-440i	13	6	4750,00	21,10	0,00	2141,68	18,57	2608,32	34,09	0,00	0,00	5,61
2	BW30-440i	7	6	2141,68	18,22	0,00	950,23	16,28	1191,44	28,92	0,00	0,00	14,59

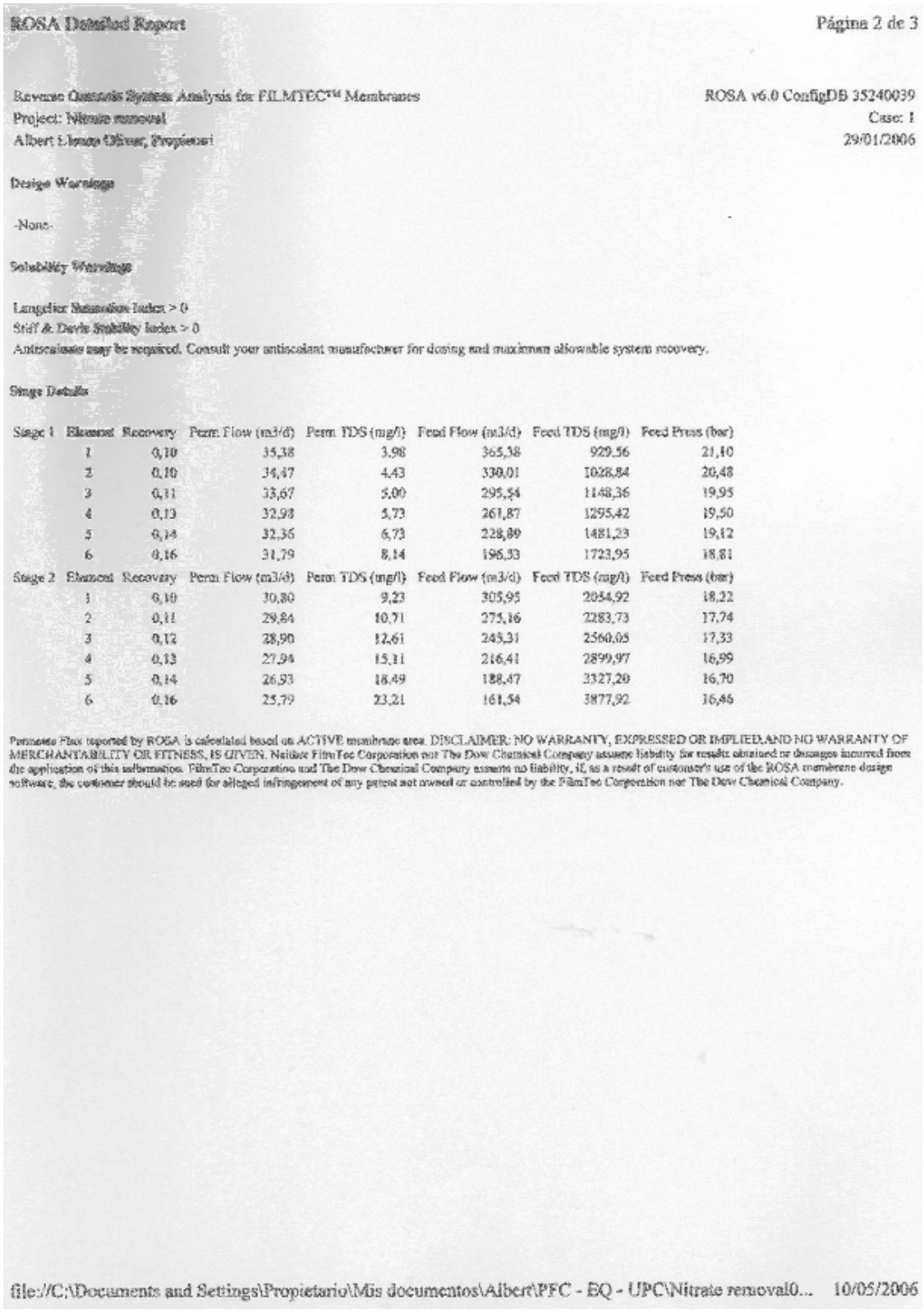
Pass Streams (mg/l as Ion)

Name	Feed	Adjusted Feed	Concentrate		Permeate			Blended Total
			Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	Total	
NH4	0,00	0,08	0,17	0,38	0,00	0,01	0,01	0,02
K	7,00	7,00	15,29	33,79	0,19	0,55	0,30	1,91
Na	82,80	83,77	184,77	413,39	0,84	2,43	1,34	21,12
Mg	33,50	33,50	74,21	166,99	0,07	0,21	0,12	8,13
Ca	135,20	135,20	299,51	673,99	0,29	0,84	0,46	32,80
Sr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CO3	0,93	0,21	1,20	7,23	0,00	0,00	0,00	0,01
HCO3	303,10	266,75	588,93	1314,65	1,66	3,19	2,11	65,29
NO3	95,10	95,10	208,53	462,91	1,96	5,65	3,12	25,20
Cl	135,70	135,70	300,58	676,27	0,32	0,94	0,52	32,96
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SO4	142,50	172,26	381,72	859,38	0,27	0,77	0,43	41,67
Boron	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SiO2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CO2	16,72	37,28	37,82	40,42	36,97	38,10	37,35	37,63
TDS	915,91	929,56	2054,92	4608,98	5,61	14,59	8,39	228,68
pH	7,60	7,00	7,29	7,54	4,94	5,20	5,03	6,45

Permeate Flux reported by ROSA is calculated based on ACTIVE membrane area. DISCLAIMER: NO WARRANTY, EXPRESSED OR IMPLIED, AND NO WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS, IS GIVEN. Neither FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company assume liability for results obtained or damages incurred from the application of this information. FilmTec Corporation and The Dow Chemical Company assume no liability, if, as a result of customer's use of the ROSA membrane design software, the customer should be sued for alleged infringement of any patent not owned or controlled by the FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company.

file://C:\Documents and Settings\Propietario\Mis documentos\Albert\PFC - EQ - UPC\Nitrate removal0... 10/05/2006

Figura 4.11 Q*ualitat de l'aigua tractada a les membranes, segons el programa ROSA*



ROSA Detailed Report — Página 2 de 3

Reverse Osmosis System Analysis for FILMTEC™ Membranes — ROSA v6.0 ConfigDB 35240039
Project: Nitrate removal — Case: 1
Albert Llensa Oliver, Propietari — 29/01/2006

Design Warnings

-None-

Solubility Warnings

Langelier Saturation Index > 0
Stiff & Davis Stability Index > 0
Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

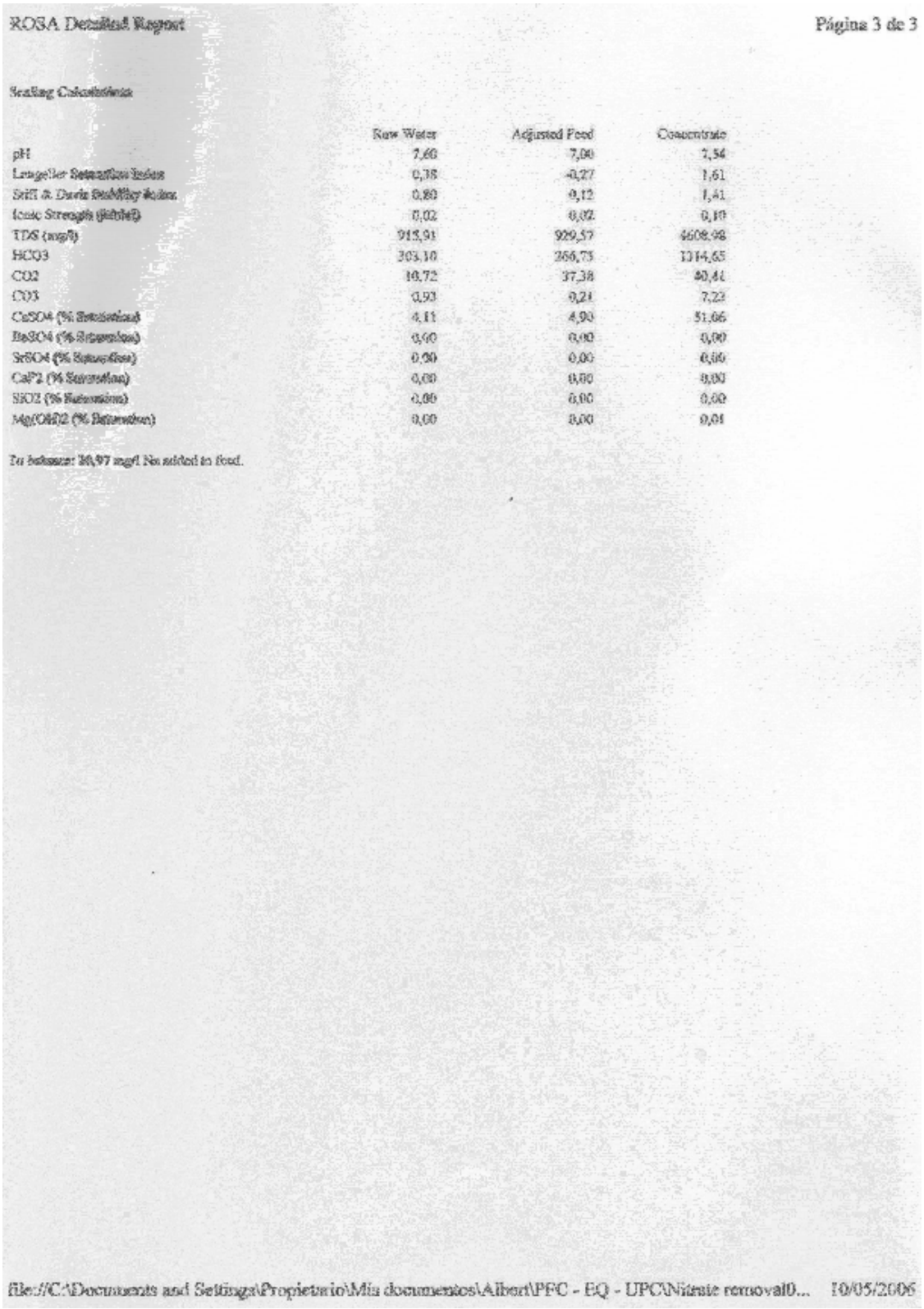
Stage Details

Stage 1	Element	Recovery	Perm Flow (m3/d)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m3/d)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
	1	0,10	35,38	3,98	365,38	929,56	21,10
	2	0,10	34,47	4,43	330,01	1028,84	20,48
	3	0,11	33,67	5,00	295,54	1148,36	19,95
	4	0,13	32,98	5,73	261,87	1295,42	19,50
	5	0,14	32,36	6,73	228,89	1481,23	19,12
	6	0,16	31,79	8,14	196,53	1723,95	18,81
Stage 2	Element	Recovery	Perm Flow (m3/d)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m3/d)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
	1	0,10	30,80	9,23	305,95	2054,92	18,22
	2	0,11	29,84	10,71	275,16	2283,73	17,74
	3	0,12	28,90	12,61	245,31	2560,05	17,33
	4	0,13	27,94	15,11	216,41	2899,97	16,99
	5	0,14	26,93	18,49	188,47	3327,20	16,70
	6	0,16	25,79	23,21	161,54	3877,92	16,46

Permeate Flux reported by ROSA is calculated based on ACTIVE membrane area. DISCLAIMER: NO WARRANTY, EXPRESSED OR IMPLIED, AND NO WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS, IS GIVEN. Neither FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company assume liability for results obtained or damages incurred from the application of this information. FilmTec Corporation and The Dow Chemical Company assume no liability, if, as a result of customer's use of the ROSA membrane design software, the customer should be sued for alleged infringement of any patent not owned or controlled by the FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company.

file://C:\Documents and Settings\Propietario\Mis documentos\Albert\PFC - EQ - UPC\Nitrate removal0... 10/05/2006

Figura 4.12 Q*ualitat de l'aigua tractada a les membranes, segons el programa ROSA*



ROSA Detailed Report

Página 3 de 3

Scaling Calculations

	Raw Water	Adjusted Feed	Concentrate
pH	7,60	7,00	7,54
Langelier Saturation Index	0,38	-0,27	1,61
Stiff & Davis Stability Index	0,80	0,12	1,41
Ionic Strength (mol/l)	0,02	0,02	0,10
TDS (mg/l)	915,91	929,57	4608,98
HCO3	203,10	266,75	1314,65
CO2	10,72	37,38	80,44
CO3	0,93	0,21	7,22
CaSO4 (% Saturation)	4,11	4,90	51,66
BaSO4 (% Saturation)	0,00	0,00	0,00
SrSO4 (% Saturation)	0,00	0,00	0,00
CaF2 (% Saturation)	0,00	0,00	0,00
SiO2 (% Saturation)	0,00	0,00	0,00
Mg(OH)2 (% Saturation)	0,00	0,00	0,01

To balance: 30,97 mg/l Na added to feed.

file://C:\Documents and Settings\Propietario\Mis documentos\Albert\PFC - EQ - UPC\Nitrate removal0... 10/05/2006

Figura 4.13 Caracterització de la corrent de concentrat o rebuig, *segons el programa ROSA*

Mitjançant les dades obtingudes amb la simulació informàtica realitzada amb el programa Rosa, es poden formular les següents conclusions sobre la planta de desnitrificació per òsmosi inversa:

- S'utilitzen 120 elements filtrants, repartits en 20 tancs, de manera que cada tanc disposa de 6 elements filtrants al seu interior. El procés s'estructura en 2 etapes en sèrie. La primera etapa conté 13 tancs i la segona etapa conté 7 tancs.

- El consum energètic del procés de desnitrificació és de 0,71 kw·h/m^3.

- La pressió d'entrada de l'aigua a tractar a la primera etapa del procés de desnitrificació és de 21,44 bars, mentres que la pressió d'entrada a la segona etapa és de 18,22 bars. Finalment, la pressió de sortida del corrent de rebuig és de 16,28 bars.

- El cabal d'aigua que es tracta a les membranes d'òsmosi inversa és de 4.750 m^3/dia. D'aquest cabal, 3.800 m^3/dia és el permeat a aprofitar, el qual presenta una concentració en NO_3^- de 3,12 mg/l.

- El cabal de rebuig de les membranes d'òsmosi inversa és de 950 m^3/dia, amb les següents concentracions: $[HCO_3^-]$ = 1.314,65 mg/l , $[NO_3^-]$ =462,91 mg/l,
  $[Cl^-]$ = 676,27 mg/l , $[SO_4^{2-}]$ = 859,38 mg/l
  $[K^+]$ = 33,79 mg/l , $[Na^+]$ = 413,39 mg/l
  $[Ca^{2+}]$ = 673,99 mg/l , $[Mg^{2+}]$ = 166,99 mg/l

4.2.3. Post-tractament

❖ **Barreja de l'aigua tractada per les membranes i l'aigua by-passada**

Un cop tractada a les membranes d'òsmosi inversa, l'aigua desnitrificada es barreja amb part d'aigua sense tractar, que by-passa el procés de desnitrificació per òsmosi inversa. D'aquesta manera s'aconsegueixen reduir els costos d'explotació, mantenint el nivell de nitrats en l'aigua subministrada en el llindar de 25 ppm NO_3^- recomenat per la Unió Europea (Cevaal et al, 1995 ; Filteau i Reilly, 1993).

A més, l'òsmosi inversa redueix enormement la mineralització de l'aigua tractada, ja que reté la major part de les sals minerals presents en l'aigua. Llavors, amb la barreja s'obté una aigua a subministrar més mineralitzada, factor important si es té en compte que es tracta d'una aigua pel consum públic, i el cós humà no tolera aigües excessivament desmineralitzades.

El volum del dipòsit de barreja serà d'un 10% de la quantitat total d'aigua a subministrar diàriament (500 m^3), el material constructiu emprat serà el formigó armat, i es disposarà de dos agitadors mecànics, de 10 kw de potència cadascun, per tal d'aconseguir una barreja complerta de l'aigua a subministrar.

Per altra banda, aquest dipòsit de barreja també serveix com a bassa pulmó, per tal de cobrir puntes hidràuliques de demanda.

Tenint en compte que s'han de subministrar 5.000 m^3/dia d'aigua potable, i que les membranes d'òsmosi inversa generen 3.800 m^3/dia de permeat, la quantitat d'aigua by-passada serà:

$$Q_{\text{by-pass}} = 5.000 - 3.800 = 1.200 \ m^3/\text{dia}$$

Per altra banda, la qualitat de l'aigua potable subministrada serà:

$[NO_3^-]$ = 25,20 mg/l	$[Na^+]$ = 21,12 mg/l
$[SO_4^{2-}]$ = 41,67 mg/l	$[K^+]$ = 1,91 mg/l
$[Cl^-]$ = 32,96 mg/l	$[Mg^{2+}]$ = 8,13 mg/l
$[HCO_3^-]$ = 65,29 mg/l	$[Ca^{2+}]$ = 32,8 mg/l

❖ Desinfecció de l'aigua a subministrar

Abans d'enviar l'aigua cap a la xarxa municipal d'abastament d'aigua potable s'ha de procedir a la seva desinfecció, per tal d'eliminar la possible presència de qualsevol tipus de microorganismes patògens.

La desinfecció de l'aigua es realitza amb clor, un agent fortament oxidant, en forma d'hipoclorit sòdic.

Per tal d'aconseguir una correcta desinfecció de l'aigua, s'ha de garantir un temps de retenció mínim d'uns trenta minuts de contacte de l'hipoclorit sòdic amb l'aigua.

A més, l'hipoclorit sòdic no solament elimina els possibles microorganismes patògens que pugui haver-hi a l'aigua, sinó que a més, es dosifica de tal forma que es mantingui una petita quantitat de clor residual a l'aigua subministrada (0,25 – 0,3 mg/l), per tal que serveixi de garantia higiènica fins que aquesta aigua arribi al diferents punts de consum.

❖ Ajustament del pH de l'aigua a subministrar

Un cop s'ha barrejat l'aigua tractada per les membranes d'òsmosi inversa i l'aigua by-passada, la barreja presenta un pH de 6,45. Si a més es té en compte que posteriorment se li ha afegit clor, com a agent desinfectant, el pH pot haver disminuit fàcilment fins a valors propers als 6.

Aquests valors són excessivament àcids, ja que es recomana que l'aigua per consum humà presenti un pH neutre situat entre 7 i 8.

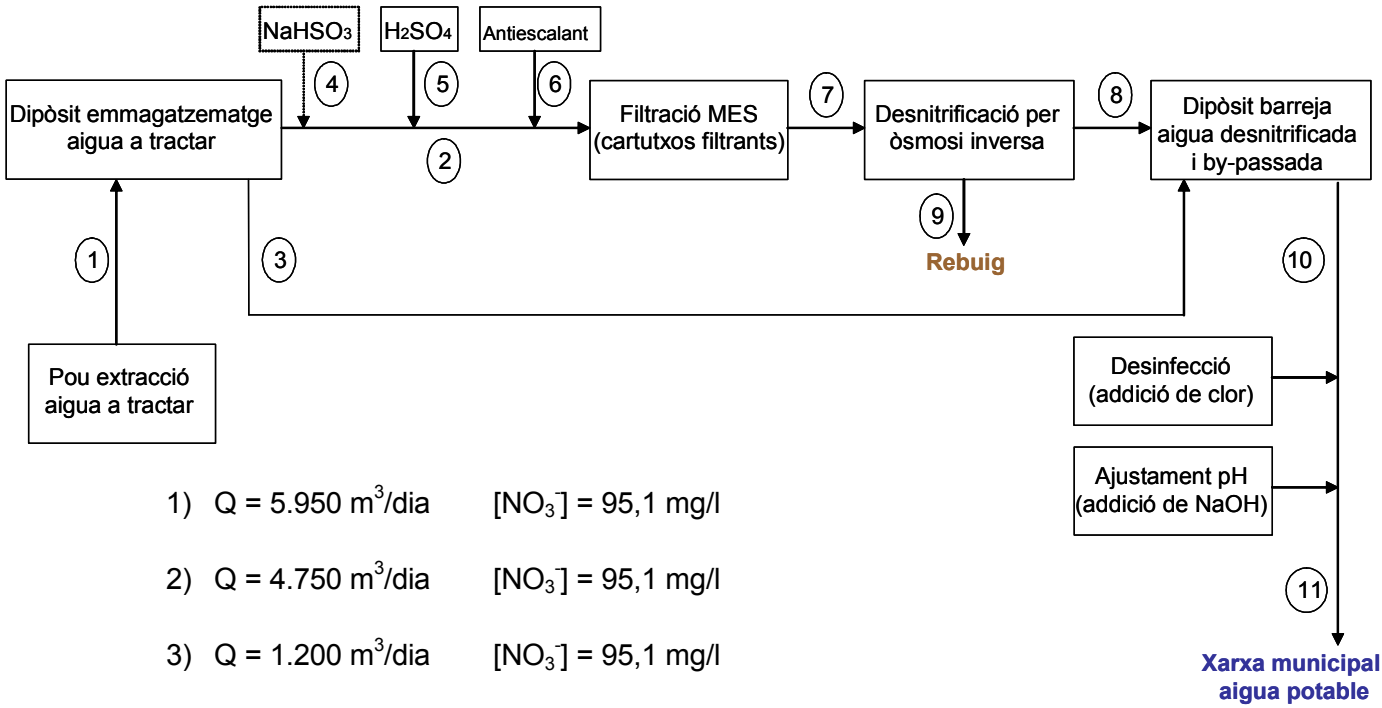
El *Real Decreto 140/2003*, relatiu als criteris sanitaris de la qualitat de l'aigua per consum humà, estableix que el pH de l'aigua s'ha de situar entre 6,5 i 9,5.

Per altra banda, l'aigua barrejada al dipòsit de post-tractament presenta un caràcter marcadament àcid i corrosiu, que podria provocar problemes de corrosió en la xarxa municipal de distribució d'aigua potable.

Llavors, augmentant el pH de l'aigua a subministrar fins a valors propers a 8, s'aconsegueix reduir el poder oxidant i corrosiu de l'aigua, i a més, es compleix amb el *Real Decreto 140/2003.*

Així doncs, el pH de l'aigua a subministrar s'augmentarà fins a valors propers a 8, i per aconseguir-ho es dosificarà hidròxid sòdic.

4.3. Diagrama de flux de la planta



1) Q = 5.950 m^3/dia [NO_3^-] = 95,1 mg/l

2) Q = 4.750 m^3/dia [NO_3^-] = 95,1 mg/l

3) Q = 1.200 m^3/dia [NO_3^-] = 95,1 mg/l

4) Opcional en cas de caràcter oxidant de l'aigua a tractar (normalment aturat).

5) Dosificació H_2SO_4 = 30,38 mg/l

6) Dosificació anti-escalant = 3 mg/l

7) Q = 4.750 m^3/dia [NO_3^-] = 95,1 mg/l [MES] ≤ 1 mg/l

8) Q = 3.800 m^3/dia [NO_3^-] = 3,12 mg/l

9) Q = 950 m^3/dia [HCO_3^-] = 1.314,65 mg/l [NO_3^-] =462,91 mg/l
[Cl^-] = 676,27 mg/l [SO_4^{2-}] = 859,38 mg/l [K^+] = 33,79 mg/l
[Na^+] = 413,39 mg/l [Ca^{2+}] = 673,99 mg/l [Mg^{2+}] = 166,99 mg/l

10) Q = 5.000 m^3/dia [NO_3^-] = 25,20 mg/l pH = 6,45

11) Q = 5.000 m^3/dia [NO_3^-] = 25,20 mg/l pH ≅ 8 [SO_4^{2-}] = 41,67 mg/l
[Cl^-] = 32,96 mg/l [HCO_3^-] = 65,29 mg/l [Na^+] = 21,12 mg/l
[K^+] = 1,91 mg/l [Mg^{2+}] = 8,13 mg/l [Ca^{2+}] = 32,8 mg/l

4.4. Fitxes d'equips

❖ **Pou extracció aigua a potabilitzar**

- Tipus: de tubs clavats
- Profunditat: 50 metres
- Diàmetre interior: 2 metres
- Reixa entrada aigua al pou: 1 metre d'alçada, 2.100 forats/m^2, forats de secció 1,5 cm^2

❖ **Bombes extracció aigua a potabilitzar**

- 2 bombes centrífugues submergibles (1 opera i l'altre de reserva, alterant el seu funcionament de forma automàtica).
- Cabal bombeig: 300 m^3/h
- Alçada manomètrica a superar: 50,5 metres
- Potència de funcionament: 70 kw
- Cada bomba disposa d'una vàlvula d'aspiració i una vàlvula d'impulsió.

❖ **Canonada extracció aigua a potabilitzar**

- Material: metàl·lica
- Diàmetre interior: 40 cm.
- Llargada: 50 metres

❖ **Dipòsit emmagatzematge aigua a potabilitzar**

- Material: formigó armat
- Volum: 500 m^3
- Disposa d'una sonda de nivell mínim que activa el bombament del pou, i d'una sonda de nivell màxim que atura el bombament del pou i realitza l'alternància de funcionament entre les dues bombes del pou.

❖ **Filtració MeS aigua a desnitrificar**

- Tipus: filtres de 6 cartutxos de polipropilé bobinat, de 5 μm de selectivitat.
- Disposició: 20 filtres de cartutxos, operant en paral·lel.
- Cada filtre disposa d'un manòmetre de mesura de la pressió diferencial entre l'entrada i la sortida, per tal de controlar l'embrutament dels cartutxos filtrants.

❖ **Membranes d'òsmosi inversa**

- El sistema de treball s'estructura en flux-pistó, amb 2 etapes en sèrie. La primera etapa conté 13 tancs, i la segona etapa conté 7 tancs.
- Cada tanc disposa de 6 elements filtrants al seu interior, de manera que tot el procés conté 120 elements filtrants. La superfície de contacte de cadascun dels elements filtrants és de 40,9 m^2 de membrana.
- El flux operacional de l'aigua a través de les membranes és de 32,28 $l/m^2 \cdot h$
- El percentatge de recuperació d'aigua tractada del procés d'òsmosi inversa és del 80 %.
- El consum energètic del procés de desnitrificació és de 0,71 $kw \cdot h/m^3$.
- La pressió d'entrada de l'aigua a tractar a la primera etapa del procés de desnitrificació és de 21,44 bars, mentres que la pressió d'entrada a la segona etapa és de 18,22 bars. Finalment, la pressió de sortida del corrent de rebuig és de 16,28 bars.

❖ **Dipòsit barreja aigua desnitrificada per resines i aigua by-passada**

- Material: formigó armat
- Volum: 500 m^3
- Disposa de dos agitadors mecànics, de 10 kw de potència cadascun, per tal d'aconseguir una barreja complerta de l'aigua subministrada.

5. Disseny d'una planta d'eliminació de nitrats mitjançant Electrodiàlisis Reversible

5.1. Introducció a la tecnologia

L'electrodiàlisis és una tecnologia de membranes semi-permeables, les quals permeten el pas a través seu dels ions dissolts en l'aigua, però en canvi, no permeten el pas de la pròpia aigua.

Les membranes utilitzades són làmines de bescanvi iònic, alternant-se una membrana aniònica amb una catiònica progressivament.

El principi de funcionament de la tecnologia es pot observar en la figura 5.1.

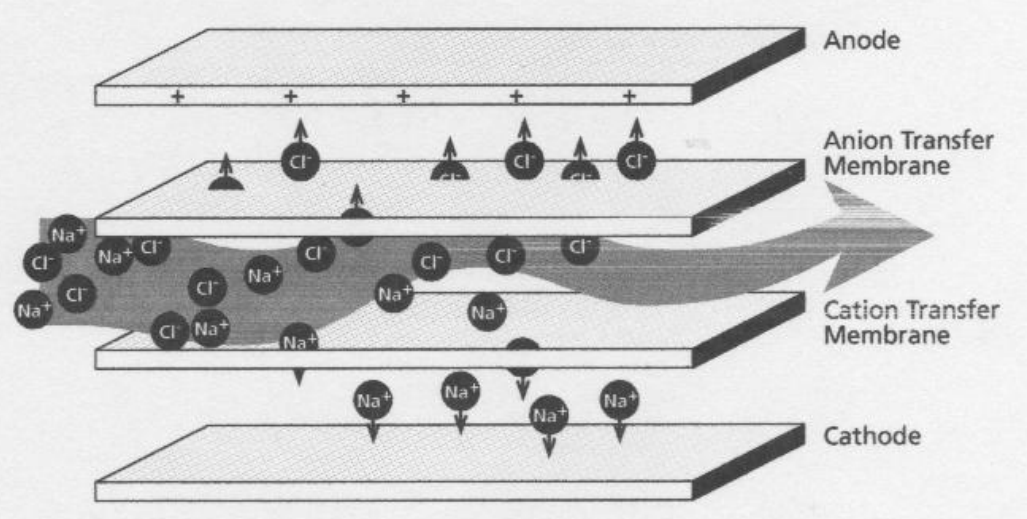


Figura 5.1 *Principi de funcionament de l'electrodiàlisis*

Com es pot veure a la figura 5.1, el principi de funcionament de la tecnologia es basa en crear una sèrie de canals separats per la combinació de forma alternada de membranes aniòniques i catiòniques. Finalment, als extrems es situen els elèctrodes. A un costat es situa un ànode, i a l'altre costat es situa un càtode.

Llavors, s'aplica una diferència de voltatge entre els dos elèctrodes dels extrems, i es fa circular l'aigua a tractar a través dels canals centrals.

Com a conseqüència del camp elèctric establert entre els dos elèctrodes dels extrems, els anions presents a l'aigua es desplaçen cap a l'ànode, i els cations cap al càtode. Però els anions només poden atravessar les membranes aniòniques,i queden retinguts quan troben una membrana catiònica. Per contra, els cations només poden atravessar les membranes catiòniques, i queden retinguts quan troben una membrana aniònica.

D'aquesta manera, com que les membranes semi-permeables s'han situat de forma alternada una catiònica i una aniònica, també es creen de forma alternada els canals de diluit i concentrat. En els canals de diluit es redueix la concentració de sals en l'aigua tractada, mentres que en els canals de concentrat o rebuig s'augmenta la concentració de sals.

La formació d'aquests canals de diluit i concentrat es pot observar en la figura 5.2.

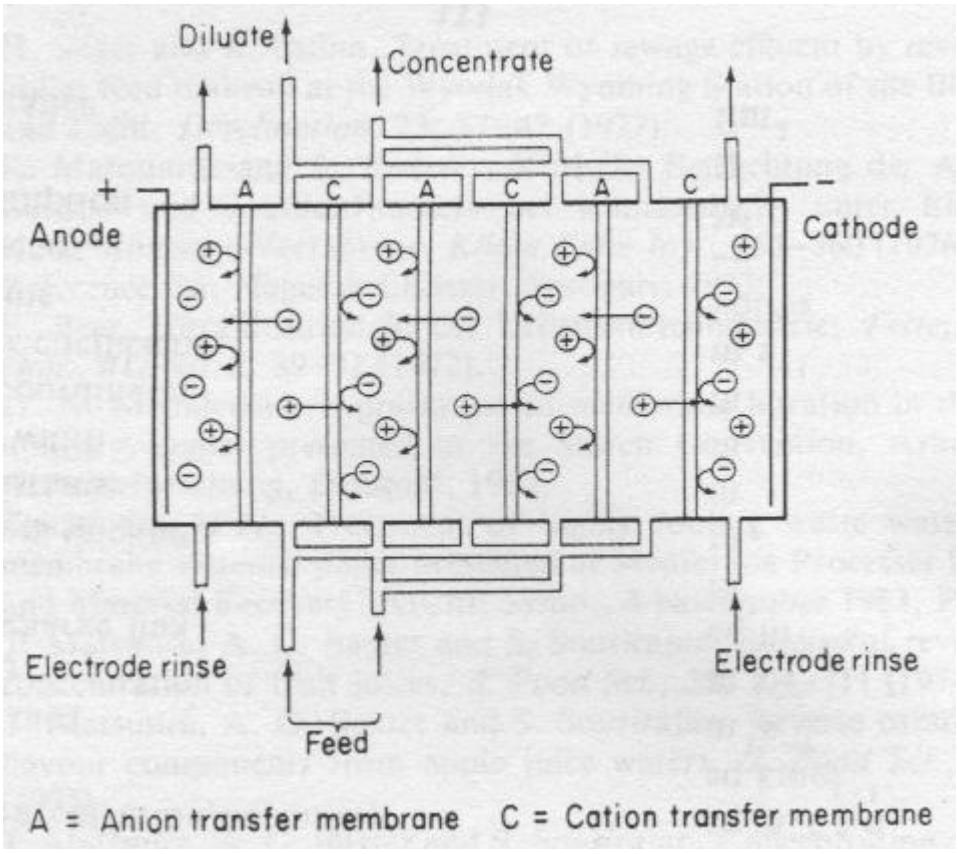


Figura 5.2 *Formació dels canals de diluit i concentrat en un equip d'electrodiàlisis*

Finalment, el corrent de diluit obtingut als tancs d'electrodiàlisis és aprofitat, mentres que el corrent de concentrat es recircul·la en la seva major part, per tal de reduir el cabal de rebuig generat pel procés.

Cal destacar que com a sub-productes, a l'ànode es generen àcids i oxígen, mentres que al càtode es generen hidrògen i hidròxid sòdic. Aquests sub-productes, s'eliminen del procés mitjançant una dissolució d'esbandit dels elèctrodes, que a la figura 5.2 s'ha representat com a *"electrode rinse*".

Les membranes d'electrodiàlisis han evolucionat amb el temps. Inicialment, s'utilitzaven membranes heterogènies, que s'obtenien combinant resines de bescanvi iònic amb algun tipus de polímer com polipropilé o poliestiré. Actualment, les membranes d'electrodiàlisis són homogènies, i s'obtenen per polimerització o policondensació de polielectrolits.

Les membranes d'electrodiàlisis comercials (Asahi Glass, Astom, Tokuyama Soda) presenten un gruix de làmina situat entre 0'15 i 0'6 mm, i una baixa resistència elèctrica, que normalment es situa entre $3 \cdot 10^{-4}$ i $3 \cdot 10^{-3}$ $\Omega \cdot m^2$, a temperatura ambient i en una dissolució d'NaCl 0,5 N.

En els equips d'electrodiàlisis, per quantificar la seva capacitat es parla de parells-cel·la. Cada parell-cel·la està format per una membrana catiònica, un canal de diluit, una membrana aniònica i un canal de concentrat. Els equips comercials d'electrodiàlisis (Ionics, Eurodia) normalment contenen entre 300 i 500 parells-cel·la si són petits, i entre 500 i 900 parells-cel·la quan es tracta de tancs de gran capacitat.

Per altra banda, el concepte de polaritat reversible ha estat un gran avenç dins el món de l'electrodiàlisis. En l'electrodiàlisis reversible, la direcció de la corrent elèctrica, i per tant, el flux de cations i anions, s'inverteixen cada cert període de temps. Això s'aconsegueix situant un ànode i un càtode a cadascun dels extrems dels tancs d'electrodiàlisis reversible.

D'aquesta manera es pot invertir la polaritat dels dos extrems del tanc de forma periòdica, i això provoca que també s'inverteixi el flux dels ions de forma periòdica. Aquestes inversions periòdiques de polaritat redueixen enormement la capacitat de formació d'incrustacions a les membranes, de manera que s'evita haver d'aplicar anti-escalants a l'aigua d'entrada als equips.

En els equips d'EDR (electrodiàlisis reversible), gràcies a les inversions periòdiques de polaritat, només cal addicionar una petita quantitat d'àcid clorhídric a la corrent de concentrat a recircul·lar, i això és suficient per evitar problemes de precipitació i incrustació de sals a les membranes (Ionics, 2006 ; Eurodia, 2006).

En el cas concret de l'eliminació de nitrats en aigües subterrànies, els equips d'electrodiàlisis presenten membranes catiòniques amb grups funcionals sulfonat (SO_3^-) i membranes aniòniques amb grups funcionals amoni (NH_4^+) (Sanchis, 2006).

Per altra banda, els ànodes utilitzats seran d'una combinació de platí i titani, mentres que els càtodes seran d'acer inoxidable (Rautenbach et al, 1987).

Un altre concepte a tenir en compte és que, a diferència de les plantes de desnitrificació per intercanvi iònic o òsmosi inversa, en l'EDR no es by-passa una part de l'aigua subterrània sense tractar, sinó que tota l'aigua potable produida ha circulat a través de les membranes d'electrodiàlisis. Això és degut a que es pot ajustar la intensitat de corrent elèctric que circula a través dels tancs d'EDR, fins aconseguir la qualitat desijtada de l'aigua de sortida (Ionics, 2006 ; Eurodia, 2006).

A més, en l'eliminació de nitrats en aigües subterrànies, normalment s'aplica un sistema d'electrodiàlisis reversible basat en dos o tres etapes en sèrie (Sanchis, 2006 ; Prato i Parent, 1993).

Per altra banda, el corrent de concentrat o rebuig, es recircul·la per tal de minimitzar-ne la seva producció final. Tot i això, la recircul·lació de concentrat no és un circuit totalment tancat, sinó que hi ha una petita purga de concentrat, compensada per una aportació d'aigua de dilució, per tal de no concentrar excessivament el rebuig. Així s'aconsegueix un percentatge de recuperació del 90 % de l'aigua tractada (Sanchis, 2006 ; Hell et al, 1998 ; Prato i Parent, 1993).

5.2. Descripció del procés

5.2.1. Pre-tractament

❖ **Extracció de l'aigua a potabilitzar**

L'extracció de l'aigua subterrània es realitzarà de la mateixa forma que s'ha comentat en els capítols anteriors, pels processos d'intercanvi iònic i òsmosi inversa. És per això que alguns conceptes d'aquest sub-apartat (com el disseny del pou, el càlcul de la pèrdua de càrrega de l'aigua extreta a través de la canonada d'impulsió, o la determinació de la potència necessària per les bombes hidràuliques) s'han simplificat, per tal de facilitar la lectura del document.

Si es desitja consultar el procés complert de disseny del sistema d'extracció d'aigua a potabilitzar, només cal consultar les pàgines 60 a 64 d'aquesta memòria, on apareixen tots els càlculs de forma detallada, per la planta d'intercanvi iònic.

Tot i això, la capacitat d'extracció d'aigua de les bombes serà de 275 m^3/h, en comptes dels 250 m^3/h del procés d'intercanvi iònic o els 300 m^3/h del procés d'òsmosi inversa.

En el procés d'intercanvi iònic s'havien de tractar 5.000 m^3/dia d'aigua, i per això, aplicant un marge de seguretat del 20 %, la capacitat d'extracció d'aigua de les bombes es situava en 6.000 m^3/dia (250 m^3/h).

En el procés d'òsmosi inversa s'havien de tractar 5.950 m^3/dia d'aigua, i per això, aplicant el mateix marge de seguretat del 20 %, la capacitat d'extracció d'aigua de les bombes es situava en 7.200 m^3/dia (300 m^3/h).

En conseqüència, en el procés d'electrodiàlisis reversible s'han de tractar 5.555 m^3/dia, i per tant, aplicant el marge de seguretat del 20 %, la capacitat d'extracció d'aigua de les bombes es situarà en 6.600 m^3/dia (275 m^3/h).

Així doncs, es disposarà d'un pou d'uns 50 metres de profunditat, construit mitjançant el mètode de *tubs clavats*.

L'entrada d'aigua a l'interior del pou es realitzarà mitjançant una reixa a la seva part inferior, en contacte amb l'aqüífer. Aquesta reixa d'entrada d'aigua presentarà una densitat de 2.100 forats/m^2 tub. I la secció de cadascun dels forats serà de 1,5 cm^2, superfície suficientment petita per evitar que entri sorra i grava a l'interior del pou.

L'altura de la reixa d'entrada d'aigua serà de 1 metre, i el diàmetre interior del pou de 2 metres.

Per altra banda, la instal·lació d'extracció d'aigua del pou estarà formada per:

- 2 bombes centrífugues submergibles, una en operació i l'altre de reserva. Per tal que cap de les dues bombes no estigui massa temps aturada, el seu funcionament s'anirà alterant mitjançant una maniobra elèctrica automatitzada. Aquestes bombes han de tenir una potència d'uns 65 Kw, i el seu punt de treball estarà situat en un cabal de 275 m^3/h i una alçada manomètrica total de 50,5 metres.
- 1 vàlvula d'aspiració i 1 vàlvula d'impulsió per cadascuna de les dues bombes hidràuliques. Aquestes vàlvules permetran aïllar les bombes de la resta de la instal·lació, per quan sigui necessari extreure-les per tal de realitzar-hi tasques de manteniment.
- Una canonada metàl·lica d'impulsió d'aigua per cadascuna de les dues bombes hidràuliques. Les canonades mesuraran uns 50 metres de llargada i tindran un diàmetre interior de 40 cm.

❖ **Emmagatzematge de l'aigua a tractar**

Un cop s'ha extret l'aigua a potabilitzar del pou, aquesta s'emmagatzema en un dipòsit de regulació, que serveix de bassa pulmó per cobrir puntes hidràuliques de demanda. El volum d'aquest dipòsit serà d'un 10% de la quantitat total d'aigua a subministrar diàriament (500 m^3), i el material constructiu emprat serà el formigó armat.

Aquest dipòsit tindrà instal·lades dues sondes de nivell, una de nivell mínim i l'altre de nivell màxim. Quan el contingut del dipòsit disminueixi per sota la sonda de nivell mínim, la senyal generada per aquesta sonda, mitjançant un automatisme elèctric, posarà en funcionament una de les dues bombes d'extracció d'aigua del pou, per tal de tornar a emplenar el dipòsit.

Per contra, quan el contingut del dipòsit superi la sonda de nivell màxim, la senyal generada per aquesta sonda, mitjançant un automatisme elèctric, aturarà el funcionament de la bomba hidràulica del pou que en aquell moment estigui en marxa. A més, aquest automatisme elèctric d'aturada del bombament, també serà l'encarregat de realitzar l'alternància de funcionament entre les dues bombes del pou, mitjançant un relé elèctric.

D'aquesta manera, quan la sonda de nivell mínim torni a activar el bombament del pou, la bomba que es posarà en marxa serà la que restava aturada l'últim cop que s'havia extret aigua del pou.

❖ Addició de reactius químics

En els equips d'electrodiàlisis reversible, l'addició de reactius químics per tal d'allargar la vida útil de les membranes es realitza directament en el corrent de concentrat o rebuig (Ionics, 2006 ; Eurodia, 2006).

L'únic reactiu químic que s'addiciona en l'etapa de pre-tractament de l'aigua a potabilitzar és el bisulfit sòdic.

Les membranes d'electrodiàlisis reversible són sensibles a les substàncies oxidants, com per exemple l'oxígen o el clor. Per això, mitjançant l'addició de bisulfit sòdic es disminueix el caràcter oxidant de l'aigua, i s'evita una oxidació prematura de les membranes. Tot i això, les aigües subterrànies normalment no presenten un elevat poder oxidant, i per tant, en condicions normals no serà necessari addicionar bisulfit sòdic.

Però per tal de poder actuar en cas necessari, es disposarà d'un equip de dosificació de bisulfit sòdic, controlat per una sonda de mesura de potencial Redox. Aquesta sonda mesurarà les condicions oxidants/reductores de l'aigua a tractar, i en cas de detectar un potencial oxidant excessivament elevat, activarà la dosificació de bisulfit sòdic (Passanisi et al, 2000).

❖ Filtració de la matèria en suspensió

L'aigua que arriba a les membranes d'electrodiàlisis reversible no pot presentar un contingut elevat en partícules en suspensió o en col·loides, ja que sinó aquests obturarien fàcilment els poros de les membranes, fent-les malbé. Els fabricants de membranes recomanen que l'aigua d'entrada no presenti una concentració en MeS superior a 1 mg/l. (Ionics, 2006 ; Eurodia, 2006).

Per això, prèviament a les membranes d'electrodiàlisis reversible, l'aigua a desnitrificar es fa circular a través d'uns filtres de cartutxos, que retenen la matèria en suspensió.

Cadascun d'aquests filtres, conté al seu interior 6 cartutxos filtrants, els quals són de polipropilè bobinat i presenten una selectivitat de 5 μm, de manera que retenen les partícules en suspensió i els col·loides de tamany superior a 5 μm.

Es situaran 20 filtres de cartutxos, operant en paral·lel. Tenint en compte que la capacitat de filtració de cadascun d'ells es situa al voltant dels 15 m^3/h, la capacitat total de filtració de la MeS en el pre-tractament de la planta serà de (20 · 15 · 24) = 7.200 m^3/dia.

L'etapa de filtració de la MeS és un pas essencial pel correcte funcionament de tota la planta, i en conseqüència, ha d'operar en continu i correctament.

Llavors, per tal d'assegurar aquest funcionament correcte i continuat de l'etapa de filtració de la MeS, és molt important portar a terme un manteniment adequat dels filtres de cartutxos.

I per aconseguir desenvolupar aquest manteniment adequat dels filtres de cartutxos, aquests s'han d'aturar de forma periòdica, per tal de revisar-los i netejar-los.

És per això que s'ha decidit sobredimensionar l'etapa de filtració de la MeS (capacitat de 7.200 m^3/h), ja que així es podran desenvolupar sense problemes les tasques de manteniment dels filtres.

Per tal de controlar l'evolució del funcionament dels filtres, s'ha d'instal·lar un manòmetre de pressió diferencial a cada filtre, que prengui valors de pressió a l'entrada i la sortida del filtre.

Quan el valor marcat pel manòmetre és superior a 1 bar, els cartutxos filtrants que hi ha a l'interior del filtre s'han de netejar amb una dissolució d'hipoclorit sòdic al 15 %, durant un període de temps comprés entre 45 i 55 minuts, i després ja es poden retornar al filtre.

Però si després de realitzar aquesta operació de neteja, el manòmetre encara marca una diferència de pressió entre l'entrada i la sortida del filtre, superior a 1 bar, els cartutxos filtrants ja no es poden reutilitzar, i s'han de canviar per uns de nous.

5.2.2. Eliminació de nitrats mitjançant electrodiàlisis reversible

El primer concepte a tenir en compte és que, a diferència de les plantes de desnitrificació per intercanvi iònic o òsmosi inversa, en l'EDR no es by-passa una part de l'aigua subterrània sense tractar, sinó que tota l'aigua potable produida ha circulat a través de les membranes d'electrodiàlisis. Això és degut a que es pot ajustar la intensitat de corrent elèctric que circula a través dels tancs d'EDR, fins aconseguir la qualitat desijtada de l'aigua de sortida (Ionics, 2006 ; Eurodia, 2006).

Per tal de reduir la concentració de nitrats en l'aigua de sortida fins a l'objectiu dels 25 mg/l NO_3^-, el procés de desnitrificació ha de presentar una eficàcia del 75 %, la qual s'aconsegueix treballant amb una disposició de flux-pistó, amb 2 etapes en sèrie (Sanchis, 2006 ; Prato i Parent, 1993).

Per altra banda, el corrent de concentrat o rebuig, es recircul·la per tal de minimitzar-ne la seva producció final. Tot i això, la recircul·lació de concentrat no és un circuit totalment tancat, sinó que hi ha una petita purga de concentrat, compensada per una aportació d'aigua de dilució, per tal de no concentrar excessivament el rebuig. Així s'aconsegueix un percentatge de recuperació del 90 % de l'aigua tractada (Sanchis, 2006 ; Hell et al, 1998 ; Prato i Parent, 1993).

D'aquesta manera, per tal de produir 5.000 m^3/dia d'aigua potable, es consumiran 5.555 m^3/dia d'aigua subterrània. D'aquest corrent d'aigua subterrània, 5.000 m^3/dia es tractaran als tancs d'EDR per tal de produir l'aigua potable, i 555 m^3/dia s'aportaran al circuit de recircul·lació de concentrat, per tal de diluir-lo i compensar la purga de 555 m^3/dia de rebuig.

Tenint en compte que amb 1 m^2 de superfície de membrana d'electrodiàlisis es produeixen uns 3,5 m^3/dia d'aigua desnitrificada al 75% (Salem et al, 1995 ; Takeshita i Hanada, 1999 ; Rautenbach et al, 1987), la superfície total necessària serà:

$$5.000\ m^3/dia \cdot (1\ m^2\ membrana / 3,5\ m^3/dia) = 1.428\ m^2\ membranes\ EDR$$

En el cas concret de l'eliminació de nitrats en aigües subterrànies, els equips d'electrodiàlisis presenten membranes catiòniques amb grups funcionals sulfonat (SO_3^-) i membranes aniòniques amb grups funcionals amoni (NH_4^+) (Sanchis, 2006).

Llavors, si cada parell-cel·la disposa de dues membranes de 0,2 m^2 de superfície útil cadascuna (Eurodia, 2006), es necessitaran:

$$1.428\ m^2 \text{ superfície} \cdot (1 \text{ membrana} / 0{,}2\ m^2 \text{ superfície}) \cdot (1 \text{ parell-cel·la} / 2 \text{ membranes}) =$$

$$= 3.570 \cong 3.600 \text{ parells-cel·la}$$

Els parells-cel·la es col·loquen en tancs d'EDR. Els equips comercials d'electrodiàlisis reversible (Ionics, Eurodia) normalment contenen entre 500 i 900 parells-cel·la quan es tracta de sistemes d'elevada producció, com és el nostre cas.

Llavors, en aquest cas, distribuirem els parells-cel·la en sis tancs, de manera que cadascun dels tancs contindrà 600 parells-cel·la.

Per aconseguir l'estructura operacional de flux-pistó, amb dues etapes en sèrie, proposada anteriorment, es crearan tres línies de treball, cadascuna de les quals disposarà de dos tancs d'EDR.

Així doncs, el sistema de desnitrificació per electrodiàlisis reversible dissenyat, disposarà de tres línies de treball. Cada línia contindrà dos tancs d'EDR en sèrie. I cada tanc d'EDR disposarà de 600 parells-cel·la, amb una superfície de membranes total de 240 m^2 per cada tanc d'EDR.

La caiguda de voltatge que experimenta la corrent elèctrica al circular a través dels tancs d'EDR es situa en uns 0,6 volts/parell-cel·la (Salem et al, 1995). Per tant, la tensió elèctrica que s'haurà d'aplicar a cada tanc d'EDR serà:

$$600 \text{ parells-cel·la} \cdot (0{,}6 \text{ volts} / \text{parell-cel·la}) = 360 \text{ Volts}$$

Llavors, el consum elèctric del procés de desnitrificació es situarà al voltant dels 0,55 $kw \cdot h/m^3$ aigua tractada (Salem et al, 1995).

Per tal d'evitar la formació d'incrustacions, les pròpies inversions periòdiques de polaritat dels tancs d'EDR eviten la necessitat d'utilitzar anti-escalants. Per aconseguir portar a terme aquestes inversions periòdiques de polaritat, als extrems dels tancs d'EDR es situaran 2 parells d'elèctrodes. O sigui, a cada costat dels tancs d'EDR hi haurà un ànode i un càtode, funcionant alternativament.

Els ànodes utilitzats seran d'una combinació de platí i titani, mentres que els càtodes seran d'acer inoxidable (Rautenbach et al, 1987).

Per contra, les precipitacions de $CaCO_3$ continuen essent factibles, i per això es dosifica àcid clorhídric a la recircul·lació del corrent de concentrat. La dosificació d'àcid clorhídric es situa en 0,07 l/m^3 aigua tractada, d'una dissolució d'HCl al 35% (Eurodia, 2006 ; Sanchis, 2006).

Per tant, si tenim en compte que es tracten 5.000 m^3/dia d'aigua, la dosificació serà de 14,6 l/h d'HCl al 35 %.

Es disposarà d'un dipòsit on es realitzarà la barreja entre el concentrat a recircul·lar i l'àcid clorhídric dosificat per evitar la formació d'incrustacions de $CaCO_3$. El volum d'aquest dipòsit serà d'un 20% de la quantitat total de rebuig generat diàriament ($\cong$ 100 m^3), i el material constructiu emprat serà l'acer inoxidable. A més, aquest dipòsit disposarà d'un agitador mecànic de 2 kw de potència, per tal d'aconseguir una barreja complerta del producte.

Llavors, per determinar la capacitat d'eliminació dels diferents ions, per part del procés EDR dissenyat, s'ha realitzat un estudi bibliogràfic, tal i com es pot observar en la taula 5.1.

Referència bibliogràfica	Arden i Hall	Rautenbach i Albrecht, 1989	Prato i Parent, 1993
% eliminació NO_3^-	67	52,5	69,1
% eliminació Cl^-	70	52,2	63,3
% eliminació SO_4^{2-}	78	47,5	70,5
% eliminació HCO_3^-	61	6,9	46,5
% eliminació Mg^{2+}	70	52,2	61,7
% eliminació Ca^{2+}	70	50	50,3
% eliminació Na^+	47	48,6	32,8
% eliminació K^+	-	60	57,5

Referència bibliogràfica	Prato i Parent, 1993	Prato i Parent, 1993	Prato i Parent, 1993
% eliminació NO_3^-	80,4	92,6	86,6
% eliminació Cl^-	68,5	92	85,9
% eliminació SO_4^{2-}	79,6	-	88,2
% eliminació HCO_3^-	54,2	73,3	71
% eliminació Mg^{2+}	76,4	92,5	90
% eliminació Ca^{2+}	80,1	94,4	90,5
% eliminació Na^+	41,6	86,6	79,3
% eliminació K^+	-	-	89,4

Referència bibliogràfica	Salem et al, 1995	Hell et al, 1998	Takeshita i Hanada, 1999
% eliminació NO_3^-	62,7	65,8	75,1
% eliminació Cl^-	78,3	44,4	62,7
% eliminació SO_4^{2-}	100	2,6	2,1
% eliminació HCO_3^-	-	5,8	-
% eliminació Mg^{2+}	77,6	17,5	64,1
% eliminació Ca^{2+}	84,7	26	64,1
% eliminació Na^+	71,9	0	20,5
% eliminació K^+	-	3,8	-

Referència bibliogràfica	Eurodia, 1999	Passanisi et al, 2000	Sanchis, 2006
% eliminació NO_3^-	69,3	60	72,3
% eliminació Cl^-	52	48,2	74,1
% eliminació SO_4^{2-}	5,5	85,6	78,1
% eliminació HCO_3^-	31,6	34	60,3
% eliminació Mg^{2+}	33,3	78,8	65,4
% eliminació Ca^{2+}	43,5	80,7	69,6
% eliminació Na^+	7,6	28,7	56,5
% eliminació K^+	0	40	70

Taula 5.1 *Estudi bibliogràfic sobre la capacitat d'eliminació de ions de la tecnologia EDR*

A partir de l'estudi bibliogràfic representat a la taula 5.1, i tenint en compte els criteris de disseny aplicats a la nostra planta EDR, la capacitat d'eliminació de ions del procés EDR dissenyat serà:

	Estudi bibliogràfic	**Disseny EDR**
% eliminació NO_3^-	**71,1**	**75**
% eliminació Cl^-	**66,0**	**69,7**
% eliminació SO_4^{2-}	**58,0**	**61,2**
% eliminació HCO_3^-	**44,5**	**47**
% eliminació Mg^{2+}	**65,0**	**68,6**
% eliminació Ca^{2+}	**67,0**	**70,7**
% eliminació Na^+	**43,4**	**45,8**
% eliminació K^+	**45,8**	**48,3**

Per tant, el corrent de diluit generat als tancs d'EDR tindrà les següents característiques :

Q = 5.000 m^3/dia $[NO_3^-]$ = 23,8 mg/l $[Cl^-]$ = 41,1 mg/l $[HCO_3^-]$ = 160,6 mg/l

$[SO_4^{2-}]$ = 55,3 mg/l $[Na^+]$ = 34,0 mg/l $[K^+]$ = 3,6 mg/l $[Ca^{2+}]$ = 39,6 mg/l

$[Mg^{2+}]$ = 10,5 mg/l

Per altra banda, per determinar la capacitat d'acumulació de ions en el concentrat, per part del procés EDR dissenyat, només cal realitzar un balanç màssic per cadascun dels diferents components, tal i com es mostra a la figura 5.3.

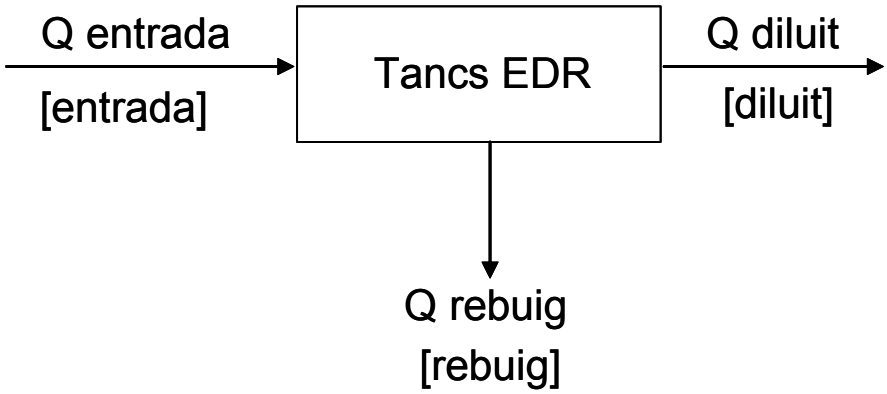


Figura 5.3 *Balanç màssic dels tancs d'electrodiàlisis reversible*

Com a exemple, determinarem la concentració de nitrats al corrent de rebuig :

$$Q_{entrada} \cdot [NO_3^-]_{entrada} = Q_{diluit} \cdot [NO_3^-]_{diluit} + Q_{rebuig} \cdot [NO_3^-]_{rebuig}$$

$$5.555 \cdot 95,1 = 5000 \cdot 23,8 + 555 \cdot [NO_3^-]_{rebuig}$$

$$[NO_3^-]_{rebuig} = 737,4 \text{ mg/l}$$

Si apliquem el mateix balanç màssic realitzat pels nitrats, per la resta de ions, obtenim que el corrent de rebuig generat als tancs d'EDR presenta les següents característiques :

Q = 555 m^3/dia $[NO_3^-]$ = 737,4 mg/l $[Cl^-]$ = 987,9 mg/l $[HCO_3^-]$ = 1586,8 mg/l

$[SO_4^{2-}]$ = 928,0 mg/l $[Na^+]$ = 322,2 mg/l $[K^+]$ = 37,6 mg/l $[Ca^{2+}]$ = 996,4 mg/l

$[Mg^{2+}]$ = 240,7 mg/l

5.2.3. Post-tractament

❖ **Emmagatzematge de l'aigua tractada per les membranes**

Un cop tractada a les membranes d'electrodiàlisis reversible, l'aigua desnitrificada s'emmagatzema en un dipòsit de regulació, el qual serveix com a bassa pulmó, per tal de cobrir puntes hidràuliques de demanda.

El volum d'aquest dipòsit serà d'un 10% de la quantitat total d'aigua a subministrar diàriament (500 m^3), i el material constructiu emprat serà el formigó armat.

❖ **Desinfecció de l'aigua a subministrar**

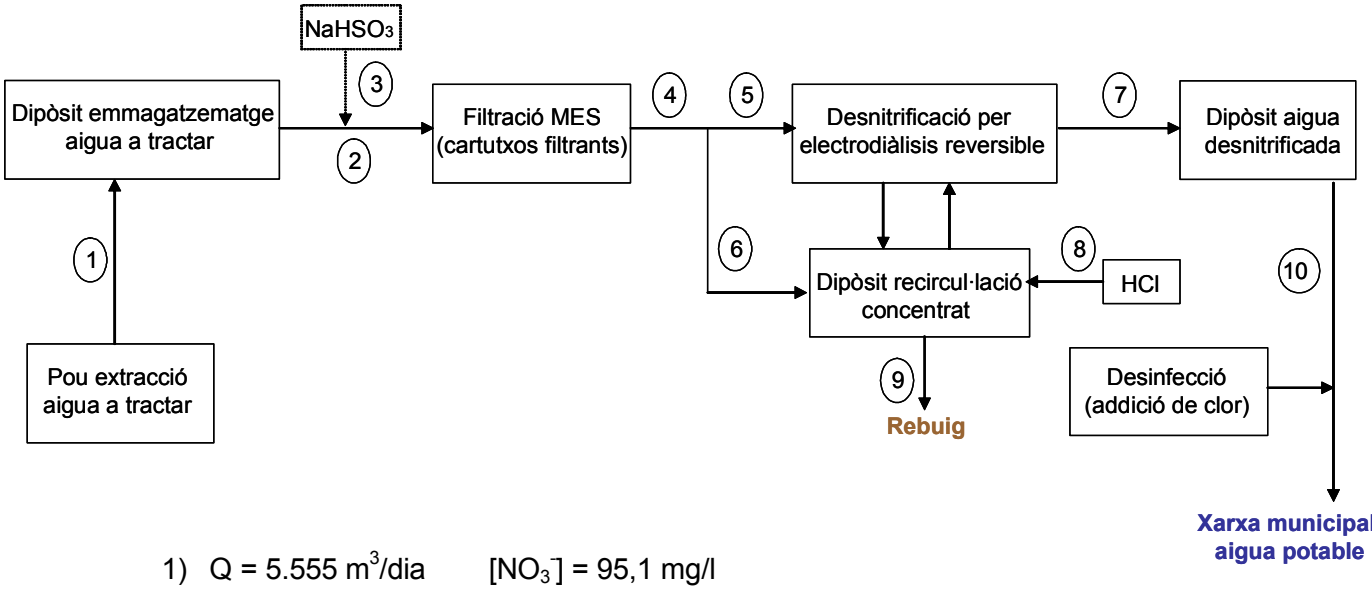
Abans d'enviar l'aigua cap a la xarxa municipal d'abastament d'aigua potable s'ha de procedir a la seva desinfecció, per tal d'eliminar la possible presència de qualsevol tipus de microorganismes patògens.

La desinfecció de l'aigua es realitza amb clor, un agent fortament oxidant, en forma d'hipoclorit sòdic.

Per tal d'aconseguir una correcta desinfecció de l'aigua, s'ha de garantir un temps de retenció mínim d'uns trenta minuts de contacte de l'hipoclorit sòdic amb l'aigua.

A més, l'hipoclorit sòdic no solament elimina els possibles microorganismes patògens que pugui haver-hi a l'aigua, sinó que a més, es dosifica de tal forma que es mantingui una petita quantitat de clor residual a l'aigua subministrada (0,25 – 0,3 mg/l), per tal que serveixi de garantia higiènica fins que aquesta aigua arribi al diferents punts de consum.

5.3. Diagrama de flux de la planta



1) Q = 5.555 m^3/dia $[NO_3^-]$ = 95,1 mg/l

2) Q = 5.555 m^3/dia $[NO_3^-]$ = 95,1 mg/l

3) Opcional en cas de caràcter oxidant de l'aigua a tractar (normalment aturat).

4) Q = 5.555 m^3/dia $[NO_3^-]$ = 95,1 mg/l [MES] ≤ 1 mg/l

5) Q = 5.000 m^3/dia $[NO_3^-]$ = 95,1 mg/l

6) Q = 555 m^3/dia $[NO_3^-]$ = 95,1 mg/l

7) Q = 5.000 m^3/dia $[NO_3^-]$ = 23,8 mg/l

8) Dosificació dº HCl al 35 % = 14,6 l/h

9) Q = 555 m^3/dia $[HCO_3^-]$ = 1586,8 mg/l $[NO_3^-]$ = 737,4 mg/l
$[Cl^-]$ = 987,9 mg/l $[SO_4^{2-}]$ = 928,0 mg/l $[Na^+]$ = 322,2 mg/l
$[K^+]$ = 37,6 mg/l $[Ca^{2+}]$ = 996,4 mg/l $[Mg^{2+}]$ = 240,7 mg/l

10) Q = 5.000 m^3/dia $[NO_3^-]$ = 23,8 mg/l $[HCO_3^-]$ = 160,6 mg/l
$[Cl^-]$ = 41,1 mg/l $[SO_4^{2-}]$ = 55,3 mg/l $[Na^+]$ = 34,0 mg/l
$[K^+]$ = 3,6 mg/l $[Ca^{2+}]$ = 39,6 mg/l $[Mg^{2+}]$ = 10,5 mg/l

5.4. Fitxes d'equips

❖ **Pou extracció aigua a potabilitzar**

- Tipus: de tubs clavats
- Profunditat: 50 metres
- Diàmetre interior: 2 metres
- Reixa entrada aigua al pou: 1 metre d'alçada, 2.100 forats/m^2, forats de secció 1,5 cm^2

❖ **Bombes extracció aigua a potabilitzar**

- 2 bombes centrífugues submergibles (1 opera i l'altre de reserva, alterant el seu funcionament de forma automàtica).
- Cabal bombeig: 275 m^3/h
- Alçada manomètrica a superar: 50,5 metres
- Potència de funcionament: 65 kw
- Cada bomba disposa d'una vàlvula d'aspiració i una vàlvula d'impulsió.

❖ **Canonada extracció aigua a potabilitzar**

- Material: metàl·lica
- Diàmetre interior: 40 cm.
- Llargada: 50 metres

❖ **Dipòsit emmagatzematge aigua a potabilitzar**

- Material: formigó armat
- Volum: 500 m^3
- Disposa d'una sonda de nivell mínim que activa el bombament del pou, i d'una sonda de nivell màxim que atura el bombament del pou i realitza l'alternància de funcionament entre les dues bombes del pou.

❖ **Filtració MeS aigua a desnitrificar**

- Tipus: filtres de 6 cartutxos de polipropilé bobinat, de 5 μm de selectivitat.
- Disposició: 20 filtres de cartutxos, operant en paral·lel.
- Cada filtre disposa d'un manòmetre de mesura de la pressió diferencial entre l'entrada i la sortida, per tal de controlar l'embrutament dels cartutxos filtrants.

❖ **Membranes d'electrodiàlisis reversible**

- El sistema d'electrodiàlisis reversible s'estructurarà en 3 línies de treball. Cada línia disposarà de 2 tancs d'EDR en sèrie. D'aquesta manera, l'organització operacional del procés serà de flux-pistó, amb dues etapes en sèrie.
- Cada tanc d'EDR contindrà 600 parells-cel·la. La superfície útil de cada parell-cel·la és de 0'4 m^2, de manera que la superfície total de membranes en cada tanc d'EDR és de 240 m^2.
- Les membranes catiòniques presenten grups funcionals sulfonat (SO_3^-), mentres que les membranes aniòniques contenen grups funcionals amoni (NH_4^+).
- La tensió elèctrica a aplicar a cada tanc d'EDR és de 360 volts, i el consum energètic del procés de desnitrificació és de 0,55 kw·h/m^3.
- El percentatge de recuperació d'aigua tractada del procés d'electrodiàlisis reversible és del 90 %.
- Als extrems dels tancs d'EDR es situaran 2 parells d'elèctrodes, un ànode i un càtode, funcionant alternativament, per tal d'aconseguir portar a terme les inversions periòdiques de polaritat. Els ànodes utilitzats seran d'una combinació de platí i titani, mentres que els càtodes seran d'acer inoxidable.

❖ **Dipòsit recircul·lació concentrat**

- Material: acer inoxidable
- Volum: 100 m^3
- Disposa d'un agitador mecànic de 2 kw de potència, per tal d'aconseguir una barreja complerta de la dissolució.

❖ **Dipòsit aigua desnitrificada**

- Material: formigó armat
- Volum: 500 m^3

6. Comparació tècnica, econòmica i medi-ambiental entre les tres tecnologies estudiades

6.1. Comparació tècnica

Realitzant una comparació tècnica entre les tres tecnologies analitzades, s'observa que totes elles són opcions totalment vàlides per la desnitrificació d'aigües subterrànies amb un contingut elevat en nitrats.

En tots tres casos s'ha assolit l'objectiu marcat, d'obtenir una aigua desnitrificada amb una concentració en nitrats propera als 25 mg/l NO_3^-, establerts per la Unió Europea com a llindar recomenable.

Mitjançant la taula 6.1, es pot realitzar una comparació de la qualitat de l'aigua obtinguda mitjançant cadascuna de les tres tecnologies analitzades, i per tant, es pot verificar que totes tres tecnologies compleixen amb el criteri de desnitrificació de l'aigua tractada fins a valors propers als 25 mg/l NO_3^-, establerts per la UE com a llindar recomenable.

Paràmetre	Aigua subterrània a tractar	Aigua tractada amb intercanvi iònic	Aigua tractada amb òsmosi inversa	Aigua tractada amb electrodiàlisis reversible
[NO_3^-] en mg/l	95,1	24,8	25,2	23,8
[Cl^-] en mg/l	135,7	303,2	32,9	41,1
[SO_4^{2-}] en mg/l	142,5	33,1	41,6	55,3
[HCO_3^-] en mg/l	303,1	231,6	65,2	160,6
[Na^+] en mg/l	62,8	62,8	21,1	34,0
[K^+] en mg/l	7	7	1,9	3,6
[Mg^{2+}] en mg/l	33,5	33,5	8,1	10,5
[Ca^{2+}] en mg/l	135,2	135,2	32,8	39,6

Taula 6.1 *Comparació de la qualitat de l'aigua obtinguda amb les tecnologies analitzades*

A més, tal i com es pot observar a la taula 6.2, les tres tecnologies s'han aplicat en casos reals de subministrament d'aigua potable amb problemes de contaminació per nitrats, obtenint-se resultats satisfactoris en les tres tècniques de desnitrificació.

Aplicacions de les tecnologies analitzades en casos reals d'eliminació de nitrats en aigües de consum humà		
Intercanvi lònic	**Òsmosi Inversa**	**Electrodiàlisis reversible**
Murcia (Espanya), Aguas de Murcia, 2004	Bellusco (Itàlia), Ionics, 1995	Gandía (Espanya), Sanchis, 2006
Avondale (EUA), Ruppenthal, 2004	Ornago (Itàlia), Ionics, 1995	Safaria (Israel), Ionics, 2000
Pomona (EUA), Canter, 1997	Sulbiate (Itàlia), Ionics, 1995	Kleylehof (Austria), Hell et al, 1998
Pipe Hill (Regne Unit), Woodward, 1994	Bernareggio (Itàlia), Ionics, 1995	Munchenbuchsee (Suissa), Eurodia, 1996
Kern County (EUA), Kartinen i Martin, 1994	Mezzago (Itàlia), Ionics, 1995	Imola (Italia), Eurodia, 1996
Isleham (Regne Unit), Andrews i Harward, 1994	Cesano (Itàlia), Ionics, 1995	Amsterdam (Holanda), Eurodia, 1996
Reignac sur Indre (França), Deguin et al, 1992	Maderno (Itàlia), Ionics, 1995	Haraucourt (França), Eurodia, 1995
Des Moines (EUA), Rash, 1992	Lainate (Itàlia), Ionics, 1995	Bermuda (EUA), Ionics, 1993
South Sttafordshire (Regne Unit), Fletcher et al, 1991	Varedo (Itàlia), Ionics, 1995	Delaware (EUA), Ionics, 1993
La Crescenta (EUA), Guter et al, 1991	Brighton (EUA), Cevaal et al, 1995	Itàlia, Ionics, 1993
Binic (França), Richard, 1989	Tustin (EUA), Filteau i Reilly, 1993	Montefano (Italia), Eurodia, 1991

Taula 6.2 *Casos reals d'aplicació de les tecnologies analitzades*

Llavors, el principal aspecte a destacar en aquesta comparació tècnica, és el fet que l'aigua potable obtinguda en la planta de desnitrificació per intercanvi iònic presenta una concentració en clorurs superior als 250 mg/l establerts com a límit al *Real Decreto 140/2003*, on es legisl·la els criteris sanitaris de la qualitat de l'aigua de consum humà a Espanya.

Per evitar aquest problema, tal i com ja s'ha comentat anteriorment en el tercer capítol d'aquesta memòria (pàgina 83), s'hauria d'aplicar una mesura correctora basada en realitzar la regeneració de les resines mitjançant dues dissolucions regeneradors (Fletcher et al, 1991).

Primer s'hauria d'aplicar una dissolució de NaCl, dosificant una quantitat propera als 120 gr. NaCl per litre de resina a regenerar. I posteriorment, s'hauria d'aplicar una dissolució de $NaHCO_3$, dosificant uns 17 gr. $NaHCO_3$ per litre de resina a regenerar (Fletcher et al, 1991).

Les dosificacions exactes de cadascun dels dos regenerants s'haurien de determinar mitjançant un estudi experimental, que permetés determinar les concentracions òptimes de treball per aconseguir la màxima eficàcia de regeneració amb el mínim consum de reactius.

Aplicant aquesta doble regeneració, quan la resina tornés a entrar en funcionament, s'evitarien les concentracions de clorurs tan elevades, provocades pel pic operacional de la primera etapa del cicle de treball, i per tant, es reduiria la presència de clorurs a l'aigua tractada.

L'eficàcia d'aquesta mesura no s'ha pogut comprovar mitjançant el programa informàtic Cadix, ja que aquest no està capacitat per simular regeneracions mitjançant la combinació de dues dissolucions regeneradores diferents.

Tot i això, la reducció de clorurs en l'aigua tractada per les resines regenerades mitjançant aquesta tècnica, es pot quantificar en un rang situat entre un 10 i un 15 % (Fletcher et al, 1991).

Aquesta reducció de la concentració de clorurs en l'aigua tractada, es pot observar de forma gràfica en la figura 6.1.

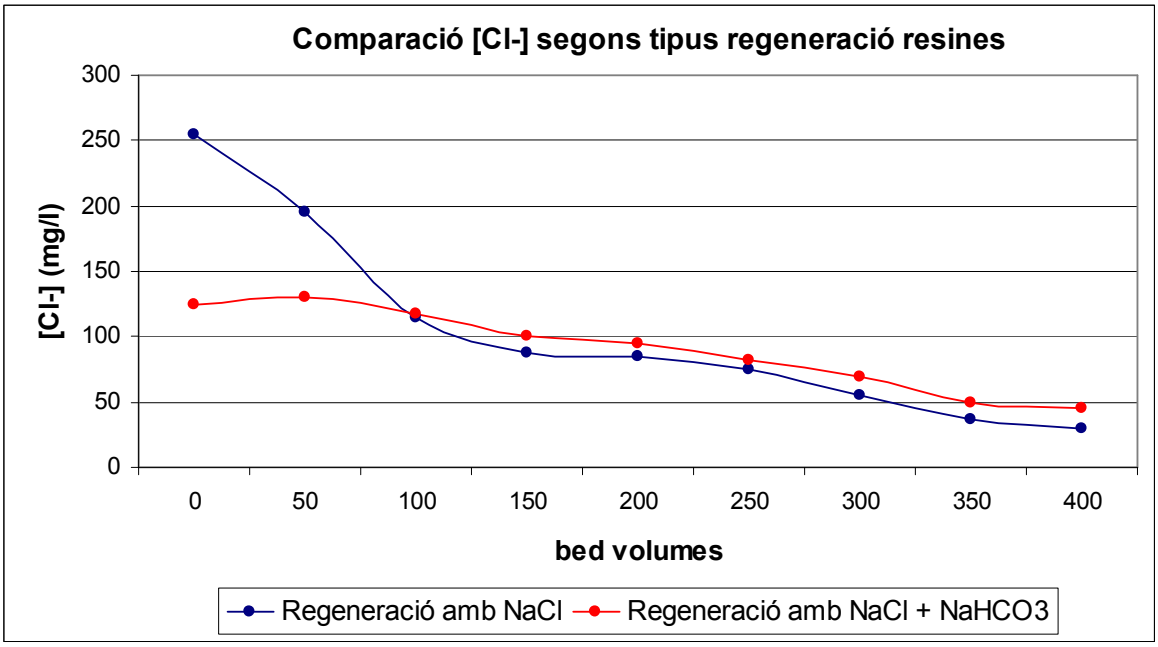


Figura 6.1 *Reducció de la concentració de clorurs en l'aigua tractada, mitjançant regeneració de les resines amb dues dissolucions (NaCl + $NaHCO_3$)* (Fletcher et al, 1991)

Així doncs, suposant el cas més favorable, en que la utilització de les dos dissolucions regeneradores aconseguís reduir un 15 % la concentració de clorurs en l'aigua tractada per les resines, el resultat final seria:

$$[Cl^-]_{\text{aigua desnitrificada}} = 353{,}8 \cdot 0{,}85 = 300{,}7 \text{ mg/l}$$

$$[Cl^-]_{\text{aigua potable subministrada}} = ((300{,}7 \cdot 3.840) + (135{,}7 \cdot 1.160)) / 5000 = 262{,}4 \text{ mg/l}$$

Observant els resultats, es pot veure que la concentració de clorurs en l'aigua subministrada encara supera els 250 mg/l establerts com a límit al *Real Decreto 140/2003.*

Així doncs, es pot concloure que l'intercanvi iònic no és una tecnologia recomenable per aquest cas concret.

Això és degut a que l'aigua subterrània a tractar, com que s'obté d'una zona costanera com és Arenys de Mar, presenta una concentració en clorurs molt elevada, provocada per la salinització dels aqüífers de la zona degut a l'aigua de mar.

O sigui, la concentració de clorurs de l'aigua a tractar és de 135,7 mg/l. En canvi, una aigua subterrània d'una zona més interior, generalment presentaria una concentració en clorurs oscil·lant entre 50 i 100 mg/l.

Llavors, aquesta elevada presència de clorurs en l'aigua subterrània de la zona d'Arenys de Mar, és la que provoca que l'aigua potable obtinguda mitjançant intercanvi iònic superi el límit de clorurs establert pel *Real Decreto 140/2003,* i per tant, no es pugui considerar una aigua apte pel consum humà.

Per tant, la conclusió final d'aquest primer apartat seria:

Les resines de bescanvi iònic no són una tecnologia recomenable quan s'ha de desnitrificar aigua subterrània provinent d'aqüífers de zones costaneres, ja que la probabilitat que l'aigua potable obtinguda superi el límit de concentració de clorurs establert al *Real Decreto 140/2003,* és molt elevada.

6.2. Comparació medi ambiental

El principal problema medi ambiental que generen els tractaments de desnitrificació d'aigua pel consum humà és el corrent de rebuig, altament concentrat en sals.

Una de les pràctiques més exteses en les plantes d'eliminació de nitrats és l'abocament d'aquest corrent de rebuig a la xarxa de sanejament municipal, per tal que sigui tractat a la corresponent estació depuradora d'aigües residuals. Tot i això, aquest corrent residual, al presentar una elevada concentració en sals, pot arribar a causar problemes al procés de depuració de les EDAR's urbanes (Kartinen i Martin, 1994 ; Deguin et al, 1992 ; Fletcher et al , 1991)

Una altre opció força utilitzada en poblacions costeres com és Arenys de Mar, es basa en abocar el corrent de rebuig directament al mar mitjançant un emissari submarí. Tot i això, la solució de l'emissari submarí comporta un impacte ambiental en la zona marítima d'abocament (Filteau i Reilly, 1993 ; Croll, 1993 ; Richard, 1989)

Llavors, tenint en compte que tant l'abocament a la depuradora urbana mitjançant la xarxa de sanejament municipal, com l'abocament al mar mitjançant emissari submarí, provoquen un important impacte ambiental, s'ha decidit buscar altres opcions que siguin més respectuoses amb el medi ambient.

En el cas de les membranes d'òsmosi inversa o d'electrodiàlisis reversible, es proposa l'aplicació del corrent de rebuig com a aigua d'irrigació, si no de forma directa, mitjançant la seva barreja amb algun tipus d'aigua de reg.

En canvi, en el cas del tractament per intercanvi iònic, el corrent d'aigua residual que es genera és menor en cabal, però per contra molt més concentrat en sals, i per això no es pot contemplar l'opció de l'irrigació, i s'ha optat per un tractament electroquímic.

Tot seguit detallarem de forma més concreta aquestes opcions.

❖ **Tractament electroquímic del rebuig generat per les resines de bescanvi iònic**

Mitjançant aquesta opció es proposa el tractament de l'aigua residual generada pel procés d'intercanvi iònic, en una cel·la electroquímica, de manera que a l'ànode es descomposi l'aigua en oxígen mol·lecular, mentres que al càtode els nitrats es transformin en nitrògen mol·lecular (Tecnologia Hidronitrex, Aguas de Murcia, 2004).

Per altra banda, els clorurs i els bicarbonats no es veuen afectats per aquest procés electroquímic, i es mantenen en l'aigua tractada.

Llavors, a la sortida de la cel·la electroquímica es disposa de dues corrents gasoses (nitrògen i oxígen mol·leculars) que s'envien a l'atmòsfera, i una corrent líquida que conté clorurs i bicarbonats, que es pot reutilizar com a regenerant.

Si s'utilitza aquest tractament de l'aigua residual, la regeneració de les resines de bescanvi iònic ja no es realitza en dos passos (primer amb dissolució de NaCl i posteriorment amb dissolució de $NaHCO_3$), sinó que la dissolució regeneradora recorre un circuit tancat, de manera que al sortir de la cel·la electroquímica ja disposa dels clorurs i els bicarbonats necessaris per regenerar les resines.

Un fet important a destacar és que per tal de poder aplicar aquest tractament de l'aigua residual, les resines utilitzades al procés de desnitrificació han de ser selectives als nitrats, ja que així no es generen sulfats en el corrent de rebuig, els quals interferirien en la cel·la electroquímica.

L'esquema operacional d'aquesta tecnologia es pot observar a la figura 6.2.

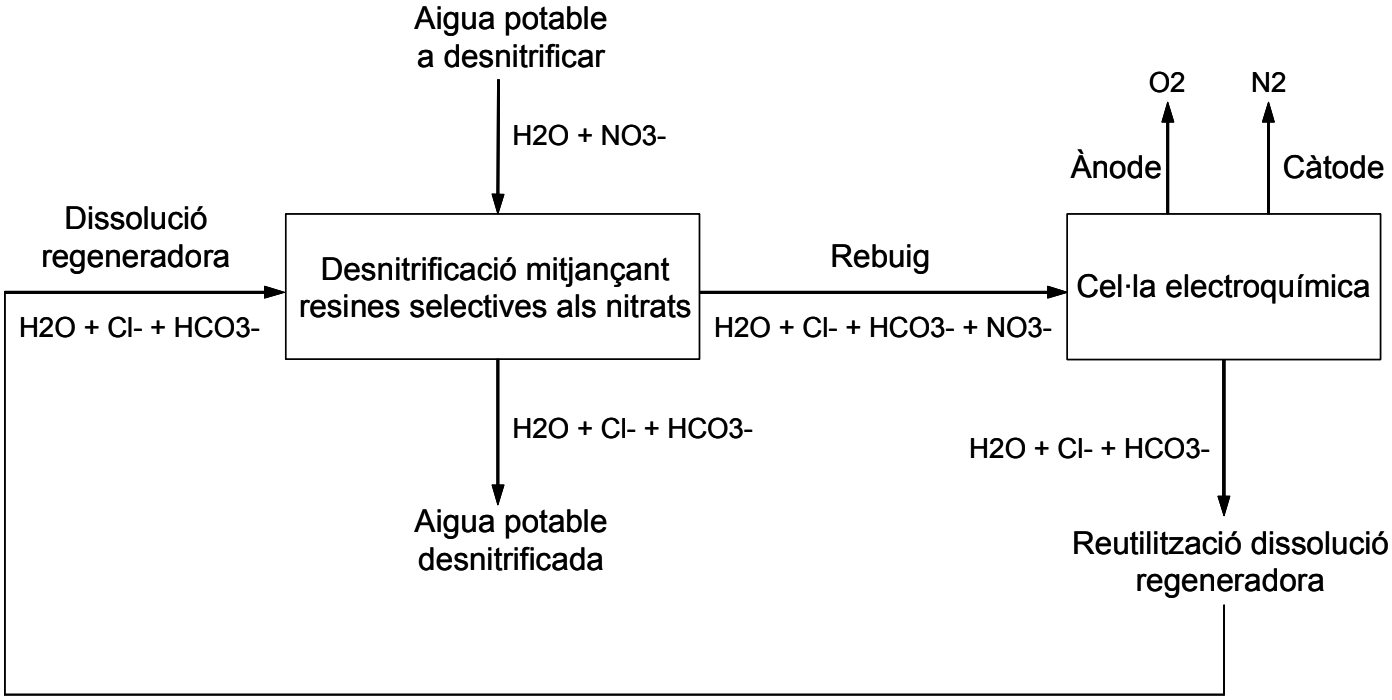


Figura 6.2 *Principi de funcionament del tractament electroquímic del rebuig generat a les resines de bescanvi iònic* (Tecnologia Hidronitrex, Aguas de Murcia, 2004).

❖ **Aprofitament per irrigació del rebuig generat per les membranes d'OI i EDR**

Mitjançant aquesta opció es proposa l'aprofitament de l'aigua residual generada pels processos de membranes, per tal d'utilitzar-la com a aigua d'irrigació. Tot i això, degut a les seves característiques, aquesta aigua residual no es pot aplicar directament sobre el camp, sinó que s'ha de barrejar amb aigua de reg, per tal d'aconseguir les característiques adequades per a l'irrigació.

Els principals paràmetres que ha de complir la barreja d'aigua residual i aigua de reg, per tal de poder ser utilitzada en l'irrigació són (Hell et al, 1998):

- Contingut en sals dissoltes: és important que l'aigua d'irrigació no presenti una mineralització excessivament elevada, i per això, el valor del contingut total en sals dissoltes es limita a un màxim de 2.500 mg/l.

- Concentració de clorurs: una presència excessiva de clorurs en l'aigua suposa un comportament extremadament agressiu per les plantes, i per això, la concentració de clorurs es limita a un màxim de 250 mg/l.

- Fracció de nitrats: els nitrats són una de les principals fonts de nutrients dels vegetals, i per això, el percentatge de nitrats sobre el contingut total en sals dissoltes ha de ser com a mínim d'un 15 %.

- Ràtio d'absorció de sodi: una presència excessiva de sodi pot ser perjudicial pel terreny irrigat, i per això la ràtio d'absorció de sodi es limita a un màxim de 1 meq/l. Aquesta ràtio es calcula mitjançant la següent fòrmula:

$$\text{Ràtio absorció sodi} = C_{Na} / [(C_{Ca}+C_{Mg}) / 2]^{0,5} \quad \text{(concentracions en meq/l)}$$

- Índex de magnesi: tot i que el magnesi és un nutrient dels vegetals, l'índex de magnesi no ha de ser superior al 50%. L'índex de magnesi es determina a partir de la següent fòrmula:

$$\text{Índex de magnesi} = [\, C_{Mg} / (C_{Mg}+C_{Ca}) \,] \cdot 100 \quad \text{(concentracions en meq/l)}$$

- Carbonat sòdic residual: per tal que l'aigua sigui adequada per a l'irrigació, el valor del carbonat sodic residual ha de ser negatiu. Aquest valor es calcula mitjançant la següent fòrmula:

$$\text{Carbonat sòdic residual} = \text{Alcalinitat} - \text{Duresa total} \quad \text{(concentracions en meq/l)}$$

Llavors, si la barreja entre l'aigua de reg i l'aigua residual generada als processos de desnitrificació per membranes d'OI o EDR, compleix els paràmetres anteriors, podrà ser utilitzada per a l'irrigació.

6.3. Comparació econòmica

Per portar a terme la comparació econòmica entre les tres tecnologies analitzades, s'han tingut en compte els següents conceptes:

- amortització de la inversió inicial per construir la planta
- cost dels reactius químics consumits al procés
- cost de l'energia elèctrica requerida per la instal·lació
- cost de la mà d'obra necessària per fer funcionar la planta
- cost del manteniment d'equips i instal·lacions

És important destacar que en la comparació econòmica no s'ha tingut en compte el cost de la gestió del rebuig generat en cada procés. Això és degut a que, tal i com s'ha comentat en l'apartat anterior (comparació medi ambiental), la gestió del rebuig presenta múltiples opcions (tractament en depuradora urbana, abocament al mar, tractament electroquímic, tractament biològic, aplicació en irrigació...), i la variabilitat del cost econòmic de cadascuna d'aquestes opcions és molt elevada.

Llavors, el cost del rebuig seria un concepte a tenir en compte quan es realitzés un estudi econòmic per un cas concret d'eliminació de nitrats, però en canvi, és un concepte molt difícil d'aplicar en una anàlisi generalista de costos, com la que es realitza en aquest apartat.

Per altra banda, la bibliografia consultada per realitzar aquesta comparació econòmica es detalla a continuació:

- Anàlisi de costos per l'intercanvi iònic: Arden i Hall ; Andrews i Harward, 1994 ; Rash, 1992 ; Deguin et al, 1992 ; Guter et al, 1991 ; Richard, 1989.

- Anàlisi de costos per l'òsmosi inversa: Arden i Hall ; Passanisi et al, 2000 ; Cevaal et al, 1995 ; Filteau i Reilly, 1993.

- Anàlisi de costos per l'electrodiàlisis reversible: Arden i Hall ; Eurodia, 2006 ; Passanisi et al, 2000.

6.3.1. Planta d'eliminació de nitrats mitjançant intercanvi iònic

❖ **Pressupost estimatiu d'inversió inicial**

- Cost dels principals equips de procés

Equips	***Cost** (€)*
Extracció i emmagatzematge aigua a tractar	250.000
Filtres MES (cartutxos filtrants)	50.000
Resines bescanvi iònic	150.000
Dipòsit preparació dissolució regeneradora	50.000
Dipòsit barreja aigua desnitrificada i by-passada	80.000
TOTAL	580.000

- Cost total de la planta

Instal·lacions	***Cost** (€)*
Principals equips de procés (PEP)	580.000
Instal·lació dels equips (30% PEP)	174.000
Xarxa de canonades i valvuleria (20% PEP)	116.000
Instrumentació de control (10% PEP)	58.000
Equips elèctrics (10% PEP)	58.000
Serveis generals (10% PEP)	58.000
Obra civil: edifici de control, magatzem, taller… (40% PEP)	232.000
TOTAL	1.276.000

- Inversió total

Apartats	***Cost** (€)*
Cost total de la planta	1.276.000
Disseny i enginyeria	250.000
Obres de construcció	500.000
TOTAL	**2.026.000**

❖ **Càlcul de l'amortització total anual**

- Instal·lacions de procés (amortització a 10 anys)

Principals equips de procés	580.000
Instal·lació dels equips	174.000
Xarxa de canonades i valvuleria	116.000
Instrumentació de control	58.000
Equips elèctrics	58.000
Serveis generals	58.000
***Amortització total** (€)*	1.044.000

Amortització anual instal·lacions de procés = 1.044.000/10 = 104.400 €/any

- Obra civil (amortització a 20 anys)

Amortització anual obra civil = 232.000/20 = 11.600 €/any

- Total

Amortització anual total = 104.400 + 11.600 = **116.000 €/any**

❖ **Determinació del cost de l'aigua potable subministrada**

- Amortització total = 116.000 €/any · (1any / 365 dies) · (1dia / 5.000m^3) = 0,063 €/m^3
- Reactius químics ≅ 0,036 €/m^3
- Energia elèctrica ≅ 0,010 €/m^3
- Mà d'obra ≅ 0,019 €/m^3
- Manteniment ≅ 0,012 €/m^3

Cost aigua potable subministrada ≅ 0,14 €/m^3

6.3.2. Planta d'eliminació de nitrats mitjançant òsmosi inversa

❖ **Pressupost estimatiu d'inversió inicial**

- Cost dels principals equips de procés

Equips	***Cost** (€)*
Extracció i emmagatzematge aigua a tractar	250.000
Filtres MES (cartutxos filtrants)	50.000
Membranes òsmosi inversa	700.000
Dipòsit barreja aigua desnitrificada i by-passada	80.000
TOTAL	1.080.000

- Cost total de la planta

Instal·lacions	***Cost** (€)*
Principals equips de procés (PEP)	1.080.000
Instal·lació dels equips (30% PEP)	324.000
Xarxa de canonades i valvuleria (20% PEP)	216.000
Instrumentació de control (10% PEP)	108.000
Equips elèctrics (10% PEP)	108.000
Serveis generals (10% PEP)	108.000
Obra civil: edifici de control, magatzem, taller… (40% PEP)	432.000
TOTAL	2.376.000

- Inversió total

Apartats	***Cost** (€)*
Cost total de la planta	2.376.000
Disseny i enginyeria	250.000
Obres de construcció	500.000
TOTAL	**3.126.000**

❖ **Càlcul de l'amortització total anual**

- Instal·lacions de procés (amortització a 10 anys)

Principals equips de procés	1.080.000
Instal·lació dels equips	324.000
Xarxa de canonades i valvuleria	216.000
Instrumentació de control	108.000
Equips elèctrics	108.000
Serveis generals	108.000
***Amortització total** (€)*	1.944.000

Amortització anual instal·lacions de procés = 1.944.000/10 = 194.400 €/any

- Obra civil (amortització a 20 anys)

Amortització anual obra civil = 432.000/20 = 21.600 €/any

- Total

Amortització anual total = 194.400 + 21.600 = **216.000 €/any**

❖ **Determinació del cost de l'aigua potable subministrada**

- Amortització total = 216.000 €/any · (1any / 365 dies) · (1dia / 5.000m^3) = 0,118 €/m^3
- Reactius químics ≅ 0,015 €/m^3
- Energia elèctrica ≅ 0,047 €/m^3
- Mà d'obra ≅ 0,021 €/m^3
- Manteniment ≅ 0,016 €/m^3

Cost aigua potable subministrada ≅ 0,22 €/m^3

6.3.3. Planta d'eliminació de nitrats mitjançant electrodiàlisis reversible

❖ **Pressupost estimatiu d'inversió inicial**

- Cost dels principals equips de procés

Equips	***Cost** (€)*
Extracció i emmagatzematge aigua a tractar	250.000
Filtres MES (cartutxos filtrants)	50.000
Membranes electrodiàlisis reversible	900.000
Dipòsit recircul·lació concentrat	50.000
Dipòsit aigua desnitrificada	80.000
TOTAL	1.330.000

- Cost total de la planta

Instal·lacions	***Cost** (€)*
Principals equips de procés (PEP)	1.330.000
Instal·lació dels equips (30% PEP)	399.000
Xarxa de canonades i valvuleria (20% PEP)	266.000
Instrumentació de control (10% PEP)	133.000
Equips elèctrics (10% PEP)	133.000
Serveis generals (10% PEP)	133.000
Obra civil: edifici de control, magatzem, taller… (40% PEP)	532.000
TOTAL	2.926.000

- Inversió total

Apartats	***Cost** (€)*
Cost total de la planta	2.926.000
Disseny i enginyeria	250.000
Obres de construcció	500.000
TOTAL	**3.676.000**

❖ **Càlcul de l'amortització total anual**

- Instal·lacions de procés (amortització a 10 anys)

Principals equips de procés	1.330.000
Instal·lació dels equips	399.000
Xarxa de canonades i valvuleria	266.000
Instrumentació de control	133.000
Equips elèctrics	133.000
Serveis generals	133.000
***Amortització total** (€)*	2.394.000

Amortització anual instal·lacions de procés = 2.394.000/10 = 239.400 €/any

- Obra civil (amortització a 20 anys)

Amortització anual obra civil = 532.000/20 = 26.600 €/any

- Total

Amortització anual total = 239.400 + 26.600 = **266.000 €/any**

❖ **Determinació del cost de l'aigua potable subministrada**

- Amortització total = 266.000 €/any · (1any / 365 dies) · (1dia / 5.000m^3) = 0,146 €/m^3
- Reactius químics ≅ 0,005 €/m^3
- Energia elèctrica ≅ 0,033 €/m^3
- Mà d'obra ≅ 0,018 €/m^3
- Manteniment ≅ 0,059 €/m^3

Cost aigua potable subministrada ≅ 0,26 €/m^3

7. Estimació del pressupost per realitzar l'estudi

En aquest capítol realitzarem un pressupost aproximat del cost econòmic de la realització d'aquest projecte.

D'aquesta manera, obtindrem una aproximació orientativa del cost econòmic que pot suposar la realització d'un estudi de característiques semblants al projecte desenvolupat.

Acció realitzada	Quantitat	Preu unitari	Preu total
Recerca bibliogràfica inicial	100 hores de treball d'un enginyer	30 euros/h	3.000 euros
Obtenció de documentació (llibres, articles de revista, catàlegs…)	50 documents	15 euros/document	750 euros
Recerca de dades analítiques sobre la contaminació dels aqüífers per nitrats	50 hores de treball d'un enginyer	30 euros/h	1.500 euros
Anàlisis sobre l'afectació de les diverses zones i elecció d'un cas d'estudi	25 hores de treball d'un enginyer	30 euros/h	750 euros
Disseny de les plantes desnitrificadores mitjançant les diferents tecnologies, i simulació informàtica dels casos plantejats	150 hores de treball d'un enginyer	30 euros/h	4.500 euros
Comparació dels resultats obtinguts per les diferents tecnologies, i formulació de les conclusions finals	75 hores de treball d'un enginyer	30 euros/h	2.250 euros
Redacció de l'estudi	125 hores de treball d'un enginyer	30 euros/h	3.750 euros
		Cost global del projecte:	**16.500 euros**

Així doncs, podem concloure que el desenvolupament d'un estudi semblant al que s'ha realitzat en aquest projecte, presentarà un cost econòmic aproximat d'uns 16.000 euros.

8. Conclusions

Les conclusions finals assolides després de la realització d'aquest estudi són:

- La toxicitat dels nitrats és deguda a la capacitat del cós humà per reduir-los a nitrits, compostos altament inestables i reactius. Llavors, l'Estat Espanyol mitjançant transposició de la legislació europea relativa a la qualitat de l'aigua pel consum humà, estableix al *Real Decreto 140/2003* que la concentració màxima permesa de nitrats en aigües potables és de 50 mg/l NO_3^-, tot i recomanar no superar un nivell de 25 mg/l NO_3^-.

- Les tres millors tècniques disponibles (MTD's), recomenades per l'Agència Europea del Medi Ambient, per aconseguir eliminar els nitrats de les aigües de consum humà són l'intercanvi iónic, l'òsmosi inversa i l'electrodiàlisis reversible.

- En l'actualitat, el Decret 476/2004, estableix que a Catalunya existeixen 9 zones vulnerables en relació amb la contaminació per nitrats dels seus aqüífers. D'aquestes àrees, la zona més afectada és l'àrea 2, la qual comprèn municipis del Maresme i la Selva, i els sistemes hidrogeològics fluviodeltaics de la Tordera i neògens i quaternaris del Maresme.

- L'eliminació de nitrats per intercanvi iónic es porta a terme amb resines aniòniques, on els ions NO_3^- extrets de l'aigua són reemplaçats per ions Cl^-. Si la ràtio sulfats/nitrats a l'aigua a tractar és inferior a 1, s'usaran resines aniòniques convencionals. Per contra, si la ràtio sulfats/nitrats a l'aigua a tractar és superior a 1, s'usaran resines aniòniques selectives als nitrats.
Les plantes d'intercanvi iónic disposen de diverses resines, les quals treballen de forma discontínua en cicles operacionals, de manera que mentres algunes estan regenerant-se o en stand-by, la resta estan treballant. És comú que les resines que estiguin treballant, operin desfasades entre elles dins el seu cicle operacional. D'aquesta manera s'aconsegueix homogeneitzar la qualitat de l'aigua de sortida, i evitar pics de concentració provocats per l'inici o el final del període operacional d'alguna de les resines
El percentatge de recuperació d'aigua tractada és del 100%, de manera que l'únic rebuig generat és la dissolució regeneradora, un cop ha circulat a través de les resines exhaustes. La regeneració de les resines es porta a terme amb una dissolució de NaCl, o amb una combinació de NaCl i $NaHCO_3$.
El pre-tractament consisteix en una filtració de la matèria en suspensió mitjançant filtres de cartutxos.

- L'eliminació de nitrats per òsmosi inversa es porta a terme amb membranes semi-permeables. Es comú situar 6 membranes en cada mòdul o tanc d'òsmosi inversa.
El procés és en continu, i el percentatge de recuperació d'aigua tractada és del 80-85%, essent el 15-20% restant el rebuig generat. La disposició de les membranes d'òsmosi inversa normalment s'estructura en dues etapes en sèrie, situant 2/3 parts del total de membranes en la primera etapa, i la tercera part restant en la segona etapa.
El pre-tractament consisteix en una filtració de la matèria en suspensió mitjançant filtres de cartutxos, i una dosificació d'àcid sulfúric i anti-escalants.

- L'eliminació de nitrats per electrodiàlisis reversible es porta a terme amb membranes catiòniques amb grups funcionals sulfonat (SO_3^-) i membranes aniòniques amb grups funcionals amoni (NH_4^+). Els ànodes utilitzats són d'una combinació de platí i titani, mentres que els càtodes són d'acer inoxidable.
Normalment s'aplica un sistema d'electrodiàlisis reversible basat en dos o tres etapes en sèrie. El procés és en continu, amb una recircul·lació interna del concentrat, on s'addiciona àcid clorhídric. La recircul·lació de concentrat no és un circuit totalment tancat, sinó que hi ha una petita purga de concentrat, compensada per una aportació d'aigua de dilució. Així s'aconsegueix un percentatge de recuperació del 90 % de l'aigua tractada, essent el 10% restant el rebuig generat.
El pre-tractament és una filtració de la matèria en suspensió mitjançant filtres de cartutxos.

- Realitzant una comparació tècnica entre les tres tecnologies analitzades, s'observa que totes elles són opcions totalment vàlides per la desnitrificació d'aigües subterrànies amb un contingut elevat en nitrats. Tot i això, cal tenir en compte que les resines de bescanvi iònic no són una tecnologia recomenable quan s'ha de desnitrificar aigua subterrània provinent d'aqüífers de zones costaneres, ja que la probabilitat que l'aigua potable obtinguda superi el límit de concentració de clorurs establert al *Real Decreto 140/2003,* és molt elevada.

- Per altra banda, mitjançant una anàlisis medi-ambiental s'observa que en el cas de les membranes d'òsmosi inversa o d'electrodiàlisis reversible, s'hauria d'estudiar la possible aplicació del corrent de rebuig com a aigua d'irrigació, si no de forma directa, mitjançant la seva barreja amb algun tipus d'aigua de reg. En canvi, en el cas del tractament per intercanvi iònic, com que el corrent d'aigua residual que es genera és menor en cabal, però per contra molt més concentrat en sals, no es pot contemplar l'opció de l'irrigació, i s'hauria d'optar per un tractament electroquímic.

- Finalment, en l'estudi econòmic s'ha determinat que el cost de l'aigua potable desnitrificada es situaria al voltant dels 0'14 €/m^3 en l'intercanvi iònic, els 0'22 €/m^3 en l'òsmosi inversa, i els 0'26 €/m^3 en l'electrodiàlisis reversible.

Bibliografia

[1] AGUAS DE MURCIA. Catálogo Hidronitex. Proceso de eliminación de nitratos.

[2] ANDREWS, D. A. ; HARWARD, C. *Isleham ion exchange nitrate removal plant.* Journal of IWEM, n. 8, April 1994.

[3] ARDEN, T.V. ; HALL, T. *Nitrate removal from drinking water: a technical and economic review of treatment processes*.

[4] CANTER, LARRY W. *Nitrates in groundwater*. Lewis Publishers, 1997.

[5] CEVAAL, JOHN N. ; SURATT, WILLIAM B. ; BURKE, J. EDWARD. *Nitrate removal and water quality improvements with reverse osmosis for Brighton, Colorado.* Desalination, n. 103, p. 101-111, 1995.

[6] CROLL, B.T. *The removal of nitrate from water using ion exchange.* Special Publication – Royal Society of Chemistry (1993), 122 (Ion exchange processes: Advances and Applications).

[7] DEGUIN, A. ; PEROT, J. ; NAULEAU, F. *Nitrate removal by ion exchange with the nitracycle process.* Water Supply, vol. 10, n. 3, pp. 161-172, 1992.

[8] DOWEX ION EXCHANGE RESINS TECHNICAL PAPER. *Designing an ion exchange system.*

[9] DOWEX ION EXCHANGE RESINS TECHNICAL PAPER. *Dowex resins design guidelines.*

[10] ELYANOW, DAVID ; PERSECHINO , JANET. *Advances in nitrate removal*. 3rd annual conference of the Israel Desalination Society, December 12, 2000.

[11] EURODIA TECHNICAL PAPER. *Electrodialysis for nitrate removal in drinking water.*

[12] FILMTEC MEMBRANES TECHNICAL PAPER. *How to design an RO / NF System.*

[13] FILTEAU, GERRY ; REILLY, JAMES F. *Nitrate removal from contaminated groundwater through reverse osmosis.* Proceedings of 1993 AWWA Membrane Technology Conference.

[14] FLETCHER, I. J. ; WOODWARD, A. J. ; HENWOOD, N. G. *Design and Construction of an ion exchange denitrification plant in South Staffordshire.* Journal of IWEM, n. 5, October 1991.

[15] GUTER, GERALD A. ; ROWLES, RANDALL L. ; KARTINEN, ERNEST O. ; ARGENIO, ROBERT K. *The economics of nitrate removal in the Los Angeles Basin. A case history.* Proceedings of 1991 AWWA Annual Conference.

[16] HELL, F. ; LAHNSTEINER, J. ; FRISCHHERZ, H. ; BAUMGARTNER, G. *Experience with full-scale electrodialysis for nitrate and hardness removal*. Desalination, 117, p. 173-180, 1998.

[17] KAPOOR, ANOOP ; VIRARAGHAVAN, T. *Nitrate removal from drinking water – review.* Journal of Environmental Engineering, n. 371, April 1997.

[18] KARTINEN, ERNEST O. ; MARTIN, CHRISTOPHER J. *Nitrate removal by ion exchange for a small water system.* Proceedings of 1994 AWWA Annual Conference.

[19] LÓPEZ, ÁNGEL. *Apuntes y fichas de apoyo de la asignatura Instalaciones Industriales Complementarias.* Enginyeria Tècnica en Química Industrial, EPS-UdG, 2001.

[20] PASSANISI , JIM ; PERSECHINO , JANET ; REYNOLDS , TODD K. *EDR, NF and RO at a Brackish Water Reclamation Facility*. Proceedings of 2000 AWWA Annual Conference.

[21] PRATO, TED ; PARENT, RICHARD G. *Nitrate and Nitrite Removal from Municipal Drinking Water Supplies with Electrodialysis Reversal.* Proceedings of 1993 AWWA Membrane Conference.

[22] RASH, VERNON D. *Nitrate removal at des Moines water works.* Proceedings of 1992 AWWA Annual Conference.

[23] RAUTENBACH, R. ; ALBRECHT, R. *Membrane Processes*. John Wiley & Sons, 1989.

[24] RAUTENBACH, R. ; KOPP, W. ; VAN OPBERGEN, G. ; HELLEKES, R. *Nitrate reduction of well water by reverse osmosis and electrodialysis – studies on plant performance and costs.* Desalination, 65, p. 241-258, 1987.

[25] RICHARD, Y. R. *Operating experiences of full scale biological and ion exchange denitrification plants in France.* Journal of IWEM, n. 3, April 1989.

[26] SALEM, K. ; SANDEAUX, J. ; MOLÉNAT, J. ; SANDEAUX, R. ; GAVACH, C. *Elimination of nitrate from drinking water by electrochemical membrane processes*. Desalination, 101, p. 123-131, 1995.

[27] SANCHIS CARBONELL, JAVIER. *Planta de eliminación de nitratos Ull del Bou (Gandía)*. Tecnoambiente, p. 98 – 101, 2006.

[28] TAKESHITA, R. ; HANADA, F. *Nitrate removal from groundwater by electrodialysis*. Transactions of the Materials Research Society of Japan, 24 [2], p. 173-175, 1999.

[29] WOODWARD, A. J. *Removing nitrates from potable water.* 1994 Yearbook of IWEM.

[30] Decret 283/1998, de 21 d'octubre, de designació de zones vulnerables en relació amb la contaminació de nitrats procedents de fonts agràries.

[31] Decret 476/2004, de 28 de desembre, pel qual es designen noves zones vulnerables en relació amb la contaminació de nitrats procedents de fonts agràries.

[32] Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.

[33] http://mediambient.gencat.net/aca/ca/inici.jsp (web de l'Agència Catalana de l'Aigua).

[34] www.eurodia.com (web empresa EURODIA).

[35] www.dow.com/liquidseps (web empresa Dow Chemical, secció tractament d'aigües).

[36] www.ionics.com (web empresa IONICS).

[37] CADIX (programa informàtic de simulació de resines de bescanvi iònic, patentat i registrat per l'empresa Dow Chemical).

[38] ROSA (programa informàtic de simulació de membranes d'òsmosi inversa, patentat i registrat per l'empresa Dow Chemical).