

APLICACIÓ D'UNA ESTRATÈGIA D'ALIMENTACIÓ ESGLAONADA EN L'ELIMINACIÓ BIOLÒGICA DE NITROGEN D'AIGÜES RESIDUALS AMB UN REACTOR SBR

Sebastià Puig, M. Teresa Vives, Lluís Corominas, M. Dolors Balaguer i Jesús Colprim

Laboratori d'Enginyeria Química i Ambiental (LEQUIA). Departament d'EQATA. Universitat de Girona. Campus de Montilivi, s/n. E-17071 Girona (Espanya). Tel. +34 972 418 355. Fax +34 972 418 150. A/c: sebastia@lequia.udg.es

RESUM

L'objectiu d'aquest article ha estat estudiar la influència de la matèria orgànica fàcilment biodegradable en el procés de desnitrificació biològica en un reactor SBR. La planta pilot SBR de 1.000 litres es va instal·lar en una depuradora urbana per tractar *in situ* l'aigua residual urbana amb un alt component industrial. Els resultats obtinguts demostren una alta eficiència d'eliminació de matèria orgànica i nitrogen de l'aigua residual amb un efluent d'alta qualitat, 51 mg/L DQO i 2,49 mg/L N_{TOTAL} , uns nivells molt per sota dels que estableix la legislació europea 91/217/CEE.

RESUMEN

El objetivo de este artículo ha sido el estudio de la influencia de la materia orgánica fácilmente biodegradable en el proceso de desnitrificación biológica en un reactor SBR. La planta piloto SBR de 1.000 litros se ubicó en una depuradora urbana para el tratamiento *in situ* del agua residual urbana con un alto componente industrial. Los resultados obtenidos demuestran una alta eficiencia de eliminación de materia orgánica y nitrógeno del agua residual con un efluente de alta calidad, 51 mg/L DQO y 2,49 mg/L N_{TOTAL} , niveles muy por debajo de los fijados por la legislación europea 91/217/CEE.

ABSTRACT

The development of new techniques has permitted an increase of using the discontinuous systems, as sequencing batch reactor (SBR), for the wastewater treatment. The SBR can perform as a biological reactor or a decanter as different as conventional systems. The pilot plant SBR of 1.000 liters has been settled down in an urban wastewater treatment plant for the *in situ* treatment of urban wastewater with a high industrial component. The goal of this study has been the studying of the influence of the readily biodegradable organic matter in the biological denitrification process. A high organic matter and nitrogen removal efficiency with a high quality of the influent, 51 mg/L COD and 2,49 mg/L N_{TOTAL} , levels below to the standard requirements have been achieved.

KEYWORDS: nitrogen removal; readily biodegradable organic matter; sequencing batch reactor (SBR); step-feed strategy; urban wastewater treatment.

INTRODUCCIÓ

L'aigua és el bé més preciós que té el nostre planeta, ja que és indispensable per a la supervivència de qualsevol organisme. Històricament, la capacitat d'autodepuració intrínseca de la naturalesa i l'efecte dilució dels rius, mars i oceans eren suficients per tractar i transformar les aigües residuals generades per l'ésser humà. Però la demanda d'aigua en aquest darrer segle XX ha augmentat el doble de ràpid que la població, a causa de l'evolució dels sistemes industrials i els sistemes agrícoles i la creixent urbanització. L'aigua no és un bé il·limitat. La quantitat d'aigua dolça disponible es va reduint dràsticament i la producció d'aigua contaminada augmenta (UNESCO, 1996).

Una vegada l'aigua és utilitzada, el seu retorn a la naturalesa no hauria de comprometre'n una utilització posterior. D'aquesta manera neix la depuració de les aigües residuals com un factor indispensable per a una bona gestió dels recursos hídrics. Inicialment els sistemes de tractament eliminaven matèria orgànica, però va sorgir la necessitat de tractar simultàniament la matèria orgànica i el nitrogen en aigües residuals en el marc de la Directiva 91/271/CEE. En aquest tractament és necessari combinar fases aeròbiques i anòxiques. Hi ha algunes configuracions que separen les dues fases en l'espai (procés Wuhrtmann, modificat per Ludzack-Ettinger o Bardenho), i en canvi, n'hi ha d'altres que les separen amb el temps (el carrusel i el reactor discontinu seqüencial o *sequencing batch reactor* (SBR)). El procés SBR engloba un conjunt de sistemes de volum variable de tractament de fangs actius. El procés SBR, utilitzant diverses estratègies d'aeració i alimentació, pot fer en un sol reactor les mateixes funcions que la resta de configuracions convencionals. Els reactors SBR poden treballar amb una gran varietat d'aigües residuals d'origen urbà (Helmreich et al., 2000; Keller et al., 2001; Mace i Mata-Álvarez, 2002; Schleyen et al., 1997; Steinmetz et al., 2002), industrial (Andreottola et al., 2001; Di Iaconi et al., 2003; Mace i Mata-Álvarez, 2002) i agrícola (Kishida et al., 2003; Mace i Mata-Álvarez, 2002; Ra et al., 1999).

El procés SBR treballa a partir de períodes, anomenats *cicles*, que es repeteixen al llarg del temps. Cada cicle està constituït per una sèrie d'etapes. Les etapes característiques d'un cicle són rebliment, reacció, sedimentació i buidatge. La utilització d'aquests cicles permet que un sol reactor pugui actuar com a reactor i decantador. Les condicions d'operació variaran en funció de l'objectiu de tractament que es proposi.

L'eliminació de nitrogen es produeix gràcies a dos processos biològics: la nitrificació, que es produeix en presència d'oxigen, i s'obtenen nitrats, i la desnitrificació, que es produeix en condicions anòxiques amb presència de matèria orgànica fàcilment biodegradable, i s'obté nitrogen gas, i d'aquesta manera es tanca el cicle del nitrogen.

Quan s'opera amb SBR per eliminar nitrogen, cal prestar una atenció especial a la utilització i la quantitat de matèria orgànica fàcilment biodegradable perquè es produeixi la desnitrificació. Si aquest substrat fàcilment biodegradable no se centra en

la desnitrificació, es produeix una eliminació parcial dels nitrats presents en el reactor i, per tant, la presència d'aquests a l'efluent.

Les diverses estratègies d'utilització racional de la matèria orgànica present a l'aigua residual tenen un objectiu comú: afavorir el rendiment de la desnitrificació. Algunes estratègies comporten un cost extra en el tractament; és el cas de l'addició d'una font externa de carboni com ara metanol o fangs procedents d'un altre reactor.

En canvi, l'addició de l'aigua que s'ha de tractar en la fase anòxica és una estratègia que no comporta cap cost afegit (sempre que la relació entre DQO i TKN sigui l'adequada) ni la necessitat d'utilitzar més equipaments. Alhora, s'ha comprovat que la utilització de dues o tres alimentacions seguides de fases anòxiques o aeròbiques en sèrie evita la necessitat de fer recircular els fangs internament (Larrea et al., 2001). Aquesta estratègia d'ompliment s'anomena *alimentació esglaonada* o *step-feed strategy*.

S'introdueix l'influent en diverses etapes, sempre en condicions anòxiques. Així, es disposa de matèria orgànica fàcilment biodegradable per desnitrificar. Si l'alimentació es produeix en una sola etapa, hi pot haver un dèficit d'alcalinitat que eviti la nitrificació completa al final de la fase aeròbica. Per tant, no es podria aconseguir una desnitrificació completa al final de la fase anòxica (Lin i Jin, 2001).

L'objectiu d'aquest article és estudiar l'eficàcia d'eliminació de nutrients, així com l'optimització de la matèria orgànica fàcilment biodegradable, utilitzant una estratègia d'alimentació esglaonada d'aigua residual urbana amb un alt contingut industrial en una planta pilot SBR.

MATERIALS I MÈTODES

Instal·lació experimental

La instal·lació experimental on es va dur a terme tot l'estudi es presenta a la figura 1. Aquesta consta d'un reactor SBR, és de forma quadrada i d'acer inoxidable, amb una capacitat màxima d'1 m³.

El volum mínim de treball és de 483 litres i el volum d'alimentació és de 200 litres per cicle. Disposa d'un agitador de tipus hèlix per tenir els fangs en suspensió i de quatre difusors disposats al fons del tanc i connectats a un bufador (SKS-80 EW) per a l'aeració en fases aeròbiques. A més, el reactor té instal·lades tres sondes pH, redox i oxigen dissolt - temperatura (Endress-Hauser CPF 81, CPF 82 i OXYMAX-W COS-41, respectivament) connectades a un PC. Aquestes sondes permeten el monitoratge, de manera que es pot veure l'evolució dels paràmetres en línia. Recentment, s'ha instal·lat un cabalímetre de flux màssic (Endress-Hauser t-mass S AT70) que s'utilitzarà per controlar el cabal d'aire aportat a l'interior del reactor i per calcular en línia la velocitat de consum d'oxigen a causa de l'activitat microbiana (OUR).

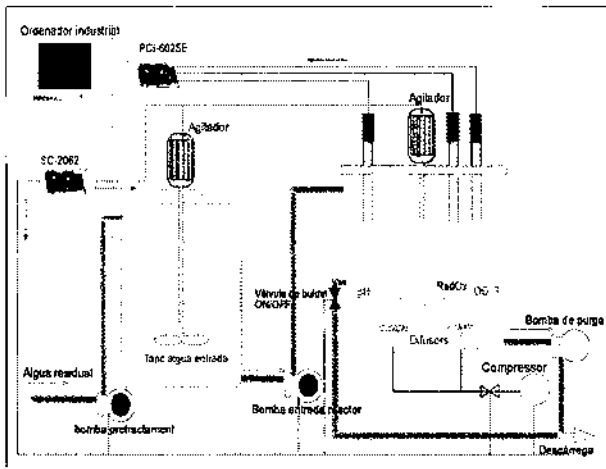


Figura 1. Esquema de la planta pilot SBR

L'aigua que s'ha de tractar entra a l'interior de l'SBR mitjançant una bomba (Watson Marlow 621 F/R RPM) que connecta el dipòsit de pretractament (on s'ha introduït prèviament amb una altra bomba) i el reactor. Una vegada l'afluent és dins el reactor, transcorren les etapes de reacció del cicle. Després d'aquestes etapes, es purguen els fangs amb l'ajuda d'una altra bomba peristàtica (Watson Marlow 621 F/R RPM). Seguidament, transcorre l'etapa de sedimentació i, finalment, en l'última etapa, el buidatge, s'obre una vàlvula *on/off* que permet la sortida de l'effluent per gravetat fins al volum mínim de treball.

L'ordinador, de tipus industrial, conté el programa de control i supervisió, que permet introduir un cicle amb les seves respectives etapes, regular el funcionament de l'agitador, el bufador, les bombes i la vàlvula de buidatge. Al mateix temps, les sondes permeten recollir dades en línia que el programa distribueix en quatre gràfics: temperatura, pH, redox i oxigen dissolt, la qual cosa permet obtenir una visió ràpida de l'estat de la planta. D'aquestes dades se'n pot extreure un coneixement de l'estat de la planta en temps real i es pot fer un sistema de control (Corominas et al., 2004). Alhora, el programa pot controlar la concentració d'OD en el reactor a partir d'un control *on/off* i calcular-ne l'OUR en línia.

Caracterització de l'aigua residual

La planta pilot SBR estava situada a la depuradora de Cassà de la Selva - Llagostera (EDARCS) per tal d'operar amb aigua residual urbana. Les diverses activitats industrials de la zona determinen en gran part les característiques de l'aigua d'entrada de l'estació depuradora d'aigües residuals (EDAR). L'aigua residual presentava un ampli rang en la concentració de DQO i nitrogen Kjeldahl, 140-1.300 mg/L DQO i 8,2 – 87,3 mg/L N, respectivament. Aquesta variabilitat és deguda a la mida de la població de Cassà de la Selva, 10.000 habitants equivalents, i la seva activitat industrial. El rang superior de treball en la concentració de DQO i nitrogen podria ser degut a l'activitat industrial de la zona. En canvi, el rang inferior podria ser degut a l'efecte de dilució del contaminant que hi ha en època de pluges. És la seva

capacitat d'adaptació a condicions dinàmiques en les càrregues que s'han de tractar, sense influir en el seu rendiment de treball, una de les característiques més importants del reactor SBR.

Mètodes analítics

Sòlids en suspensió totals (SST) 2540D, sòlids en suspensió volàtils (SSV) 2540E, demanda química d'oxigen (DQO) 5220B, amoni (N-NH₄⁺), nitrogen Kjeldahl (TKN), nitrits (N-NO₂⁻) i nitrats (N-NO₃⁻), tots mesurats segons els *standard methods* (APHA, 1995). El nitrogen total (N_{TOTAL}) es va calcular com la suma de les concentracions de TKN, nitrit i nitrat expressat en mg N · L⁻¹.

Metodologia

La configuració del cicle de treball (figura 2) és fruit d'estudis previs realitzats amb un reactor SBR de 30 litres al laboratori amb l'objectiu d'eliminar la matèria orgànica i el nitrogen (Vives et al., 2001). Aquest cicle es basava en sis alimentacions dividides al llarg del cicle, seguides d'una alternança d'etapes de reacció anòxica i aeròbica. El volum tractat per cicle era de 200 litres per cicle; per tant, uns 600 litres/dia.

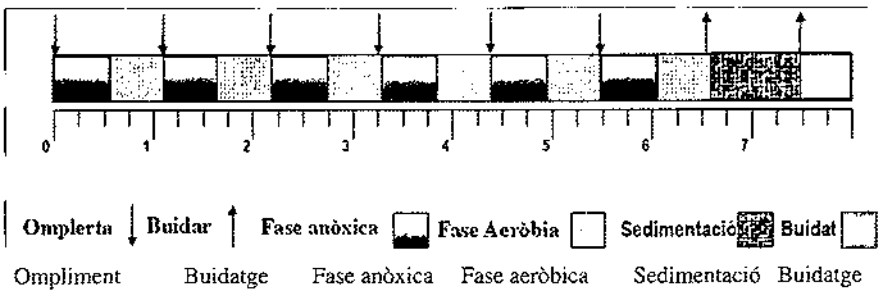


Figura 2. Esquema del cicle de 8 hores que va estar operant a la planta pilot SBR

Aquesta estratègia d'operació comportava un temps total de reacció de 395 minuts/cicle, amb un 53,8 % en condicions anòxiques i un 46,2 % en condicions aeròbiques. L'alimentació fraccionada permetia disposar de més matèria orgànica en condicions anòxiques per afavorir el procés de desnitrificació i l'esmortiment dels xocs de càrrega de possibles abocaments puntuals.

En les etapes aeròbiques es va establir un *set-point* o punt de consigna de l'oxigen dissolt a 2,0 mg/L, una concentració suficient per aconseguir la nitrificació i evitar concentracions d'OD altes al final de les etapes aeròbiques que poguessin afectar l'assoliment de les condicions anòxiques. L'última etapa de reacció era aeròbica sense alimentació. La finalitat era oxidar la matèria orgànica i provocar l'eliminació de les bombolles de N₂ retingudes en els flocs en la fase anòxica. D'aquesta manera es milloren les característiques del fang i s'evita l'efecte d'ascens (*rising*) en l'etapa de sedimentació (Larrea et al., 2001).

RESULTATS

La planta pilot es va posar en funcionament el 5 de desembre de 2002, havent realitzat les oportunes proves hidràuliques. Per a la inoculació es va utilitzar el fang de la bassa d'aeració de l'EDAR de Cassà. El motiu pel qual es va escollir aquest inòcul, tot i que la planta pràcticament no eliminava nitrogen, era degut a l'alt volum de fang que es necessitava (1 m^3), tot i que en aquells moments a l'EDAR s'eliminava matèria orgànica, mentre que el percentatge de nitrificació era molt baix (10 % - 15 %).

L'operació a la planta pilot SBR mitjançant el cicle que es presenta a la figura 2 s'ha valorat a partir del seguiment de les característiques de l'efluent.

A la figura 3 es representa l'evolució de la DQO al llarg del temps d'operació. Tot i que s'observa una alta variabilitat de la DQO a l'afluent, no afecta la qualitat de l'efluent, sempre per sota dels valors que demana la Directiva 91/271/CEE. Aquest fet constata la capacitat d'esmoreïment del reactor SBR. El rendiment d'eliminació de matèria orgànica va ser alt, un 92 % de mitjana, tot i que al principi presenta més oscil·lacions a causa de la presència de sòlids a la sortida, com ara els dies 20 i 87. El dia 55 es va produir una baixada de la DQO de l'afluent que podria ser causada per la dilució de l'afluent durant els períodes de pluja (Puig et al., 2004).

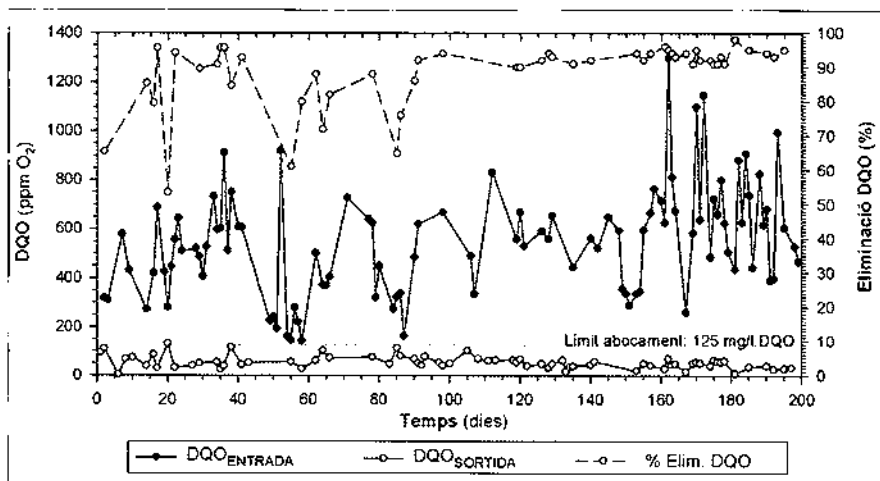


Figura 3. Evolució de la matèria orgànica i la seva eliminació durant el període experimental utilitzant un cicle de vuit hores en el reactor SBR

La taula 1 mostra que, tot i la variabilitat de l'afluent, la DQO a la sortida es manté estable, 51 mg/L DQO de mitjana. Aquest valor de DQO romanent es podria considerar com la quantitat de matèria orgànica no biodegradable present a l'afluent. Aquest valor està molt per sota dels límits marcats per la directiva europea, i només el supera puntualment durant el període de posada en marxa.

Taula 1. Caracterització de la DQO a la sortida i les condicions d'operació de la planta SBR aplicant un cicle de vuit hores

Indicador	Rang	Mitja $\pm \sigma$	TRH (dies)	TRC (dies)	Dies per sobre la normativa
DQO _{TOTAL} EFLUENT (mg/L DQO)	4-130	51 \pm 25	1.11	23.46	1 (1,4 %)

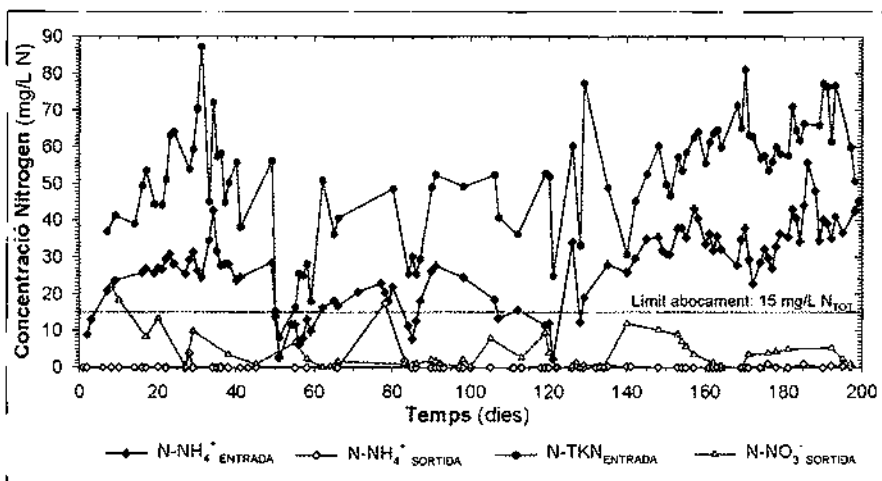


Figura 3. Evolució de les diferents formes del nitrogen en el reactor SBR durant el període experimental aplicant un cicle de 8 hores

A la figura 4 es mostra l'evolució de les diferents formes del nitrogen, en la qual no s'han inclòs els nitrats i nitrats de l'afluent ($< 0,26 \text{ mg N}\cdot\text{L}^{-1}$ i $< 0,6 \text{ mg N}\cdot\text{L}^{-1}$) i els nitrats de l'efluent ($< 0,16 \text{ mg N}\cdot\text{L}^{-1}$), ja que s'ha considerat que els seus valors eren negligibles.

Igual que la matèria orgànica, la concentració de nitrogen a l'afluent presenta una alta variabilitat que no afecta la seva concentració a la sortida. La concentració d'amoni es manté sempre a valors no detectables a l'efluent, excepte el dia 78, que coincideix amb una reinoculació del fang.

En alguns punts s'observa una acumulació de nitrats, tot i que no gaire important. Això és degut a problemes en l'equipament, relacions DQO:TKN baixes (dies 20 i 192), posada en marxa i reinoculació. El conjunt d'aquests efectes produeixen una desestabilització en el procés de desnitrificació.

En tenir concentracions d'amoni i nitrats no detectables, es pot assumir que la concentració de nitrat a l'efluent és igual al nitrogen total a la sortida. La legislació

europea fixa un límit d'abocament de 15 mg/L de nitrogen total; per tant, tot i les variacions de la concentració de nitrat, sempre es compleixen els límits establerts per la legislació (Puig et al., 2004).

Taula 2. Caracterització de les diferents formes del nitrogen a l'efluent treballant amb un TRH i un TRC d'1,11 i 23,46 dies, respectivament.

Indicador	Rang	Mitja \pm σ	TRH (dies)	TRC (dies)	Dies per sobre la normativa
DQO _{TOTAL,EFLUENT} (mg/L DQO)	4-130	51 \pm 25	1,11	23,46	1 (1,4 %)

A la taula 2 es recullen les diverses formes del nitrogen a l'efluent de la planta pilot SBR. El valor mitjà d'amoni a la sortida indica un alt percentatge de nitrificació, que es va mantenir al llarg del període experimental, tot i la variabilitat de l'efluent. Al mateix temps, el valor mitjà de nitrit a la sortida (0,06 mg N·L⁻¹) corrobora que l'única espècie present a l'efluent és el nitrat. La variabilitat de la concentració de nitrat és més significativa si s'observa el seu rang: 0 - 22,10 mg/L N-NO₃⁻. Aquest ampli rang és degut a la baixada dels rendiments d'eliminació de nitrogen en l'etapa anòxica, quan es produeix qualsevol tipus de fenomen extern com ara fallades de l'equipament, posada en marxa, període de pluja, etc. Tot i això, el nitrogen total a l'efluent, bàsicament en forma de nitrat, es manté en el 92 % dels dies a valors sensiblement inferiors als límits d'abocament, amb una concentració mitjana de 2,49 mg/L N_{TOTAL,EFLUENT}, i s'assoleix un rendiment mitjà d'eliminació de nitrogen del 91 %.

CONCLUSIONS

La planta pilot SBR ha aconseguit un efluent d'alta qualitat, aplicant una estratègia d'alimentació esglaonada malgrat la variabilitat de l'aigua residual. Les sis etapes d'alimentació combinades amb una alternança de la seqüència anòxic i aeròbic ha estat suficient per obtenir unes concentracions mitjanes a l'efluent de 51 mg DQO·L⁻¹ i 2,49 mg N_{TOT}·L⁻¹, molt per sota dels nivells marcats per la legislació europea.

L'alt rendiment d'eliminació de nitrogen aconseguit és fruit de l'estratègia d'alimentació esglaonada aplicada. No ha estat necessari afegir-hi en cap moment una font de carboni externa, la qual cosa encareix el cost del tractament.

AGRAÏMENTS

Els autors volen agrair al CDTI - Govern espanyol, INIMA Servicios del Medio Ambiente (Grupo OHL), el Govern de Catalunya (Generalitat de Catalunya, Project ITT2000-10) i el Govern espanyol (MICYT-DPI-2002-04579-C02-02) el seu suport financer en aquest estudi. Els autors també volen agrair les contribucions a l'estudi de Montse Rubio, Gemma Rustullet i Anna Moreno.

Bibliografia

- APHA (1995): *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 19a ed. American Public Health Association, American Water Works Association i Water Environment Federation, Washington DC, EUA.
- ANDREOTTOLA, G.; FOLADORI, P., i RAGAZZI, M. (2001): "On-line control of a SBR system for nitrogen removal from industrial wastewater". *Water Science and Technology*, 43 (3), pàg. 93-100.
- COROMINAS, L.; RUBIO M.; PUIG, S.; VIVES, M. T.; MELÉNDEZ, J.; COLOMER, J.; BALAGUER, M. D. i COLPRIM, J. (2004): *On-line Optimisation of Step-feed Operation of an Urban Wastewater Nitrogen Removal SBR by on-line OUR Determination and ORP Analysis. Proceedings of 6th Specialist Conference on Small Water & Wastewater Systems* (11-13 febrer de 2004, Fremantle WA, Austràlia), Org.: IWA-AWA.
- DI IACONI, C.; LÓPEZ, A.; RAMADORI, R., i PASSINO, R. (2003): "Tannery wastewater treatment by sequencing batch biofilm reactor". *Environment Science Technology*, 37, 3199-3205.
- HELMREICH, B.; SCHREFF, D. i WILDERER, P. A. (2000): "Full scale experiences with small sequencing batch reactor plants in Bavaria". *Water Science and Technology*, 41 (1), pàg. 89-96.
- KELLER, J.; WATTS, S.; BATTYE, W., i CHONG, R. (2001): "Full-scale demonstration of biological nutrient removal in a single tank SBR process". *Water Science and Technology*, 43 (3), pàg. 355-362.
- KISHIDA, N.; KIM, J. H.; CHEM, M.; SASAKI, H. i SUDO, R. (2003): "Effectiveness of oxidation reduction potential and pH as monitoring and control parameters for nitrogen removal in swine wastewater treatment by sequencing batch reactors". *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 96 (3), pàg. 285-290.
- LARREA, L.; LARREA, A.; AYESA, E.; RODRIGO, J. C.; LÓPEZ-CARRASCO, M. D. i CORTACANS, J. A. (2001): "Development and verification of design and operation criteria for the step feed process with nitrogen removal". *Water Science and Technology*, 43 (1), pàg. 261-268.
- MACE, S., i MATA-ÁLVAREZ J. R. (2002): "Utilization of SBR Technology for wastewater treatment: an overview". *Industrial Engineering and Chemical Research*, 41 (23), pàg. 5539-5553.

- PUIG, S.; VIVES, M. T.; COROMINAS, L.; BALAGUER M. D., i COLPRIM J. (2004): *Wastewater Nitrogen Removal in SBRs, Applying a Step-feed Strategy: from Lab-Scale to Pilot Plant Operation. Proceedings of 3rd IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor (SBR) Technology* (22-26 febrer de 2004, Noosa, Queensland, Austràlia), Org.: AWA-IWA.
- RA, C. S.; LO, K. V., i MAIVINIC, D. S. (1999): "Control of a swine manure treatment process using a specific feature of ORP". *Bioresource Technology*, 70, pàg. 117-127.
- SCHLEYPEN, P.; MICHEL, I., i SIEWERT, H.E. (1997): "Sequencing batch reactors with continuous inflow for small communities in rural areas in Bavaria". *Water Science and Technology*, 35 (1), pàg. 269-276.
- STEINMETZ, H.; WIESE, J. i SCHMITT, T. G. (2002): "Efficiency of SBR technology in municipal wastewater treatment plants". *Water Science and Technology*, 46 (4), pàg. 293-299.
- UNESCO (1996): *Aigua dolça, aigua tèrbola, aigua escassa*. Fonts UNESCO 84.
- VIVES, M. T.; BALAGUER, M. D.; GARCÍA, R., i COLPRIM, J. (2001): "Estudi de les condicions d'operació d'un reactor discontinu seqüencial (SBR) per eliminar biològicament matèria orgànica i nitrogen". *Scientia Gerundensis*