

LA REUTILITZACIÓ PLANIFICADA DE L'AIGUA

Rafael Mujeriego

*ETS d'Enginyers de Camins, Canals i Ports,
Universitat Politècnica de Catalunya*

La reutilització d'efluents és un component intrínsec del cycle natural de l'aigua. Mitjançant l'abocament d'efluents als cursos d'aigua i la seva dilució amb el cabal circulant, les aigües residuals han estat reutilitzades incidentalment en punts situats aigua avall per a aprofitaments urbans, agrícoles i industrials. La reutilització directa o planificada de l'aigua residual a gran escala té un origen més recent i suposa l'aprofitament directe d'efluents, amb un major o menor grau de tractament previ, transportant-los fins al punt d'aprofitament a través d'un conducte específic i sense interposar-hi un abocament o una dilució en un curs natural d'aigua.

El notable desenvolupament que ha assolit la reutilització directa de l'aigua residual tractada, especialment als països amb recursos hídrics suficients, s'ha degut a la necessitat tant d'ampliar els abastaments com de resoldre els abocaments d'aigua residual. L'increment de les dotacions d'aigua d'abastament, juntament amb l'augment de població que han experimentat nombroses zones urbanes, ha fet que les fonts d'abastament tradicionals siguin insuficients per a atendre les demandes actuals. Les distàncies creixents entre les noves fonts d'abastament i els nuclis urbans, les limitacions ambientals per a construir nous embassaments i les sequeres plurianuals han dut nombroses poblacions a plantejar-se la utilització d'aigües residuals tractades com a font addicional per a aprofitaments que no requereixen una qualitat d'aigua potable. D'altra banda, les creixents exigències sanitàries i ambientals sobre la qualitat de les aigües continentals i marines, juntament amb els requisits d'ubicació i els nivells de tractament cada cop més estrictes que s'imposen als abocaments residuals, han fet que l'aigua residual tractada esdevingui una font alternativa d'abastament, econòmica i segura des dels punts de vista sanitari i ambiental.

L'objectiu d'aquesta comunicació és analitzar el paper que té la reutilització planificada de l'aigua d'efluents en una gestió integral dels recursos hídrics, especialment a les zones costaneres espanyoles, caracteritzades per dèficits estacio-

nals o permanents d'aigua. Els objectius específics d'aquesta comunicació són: 1) descriure el marc conceptual de la reutilització planificada, 2) analitzar els beneficis i les exigències de la reutilització planificada, 3) analitzar els coneixements i les experiències disponibles sobre el reg agrícola i de jardineria amb aigua regenerada, 4) analitzar els aspectes més rellevants a tenir en compte en la concepció i explotació d'un sistema de recàrrega artificial d'aquífers mitjançant aigües residuals depurades, i 5) analitzar l'interès de la reutilització de l'aigua a les zones costaneres espanyoles, tot indicant el valor aproximat dels costos de construcció, explotació i manteniment.

¹ **La reutilització planificada. Marc conceptual**

El procés de tractament necessari perquè l'aigua residual pugui ser reutilitzada s'anomena generalment regeneració i el producte d'aquest procés rep el nom d'aigua regenerada. D'acord amb el significat etimològic, la regeneració d'una aigua consisteix a tornar-li, parcialment o total, el nivell de qualitat que tenia abans d'ésser usada, igualment com les regeneracions dels sòls i de les platges miren de restaurar l'estat i la forma que tenien anteriorment.

La implantació d'un projecte de regeneració d'aigua té dos requisits essencials i complementaris: 1) definir els nivells de qualitat adequats per a cadascun dels possibles usos que es pensi donar a l'aigua i 2) establir els processos de tractament i els límits de qualitat de l'efluent recomanats per a cadascun dels usos previstos. L'elaboració i l'aprovació d'aquests dos aspectes tècnics de la regeneració d'aigua constitueixen en general, la faceta més discutida de tot el programa per la dificultat per a establir una relació causal entre la qualitat de l'aigua i els seus efectes sobre la salut i el medi ambient. Ho demostren la diversitat i heterogeneïtat dels criteris i de les normes establerts per diversos països i organitzacions internacionals sobre la reutilització d'aigua residual (USEPA, 1992; OMS, 1989). No



Reg per aspersió de cultius de consum cru a la Llanada alabesa. Efluent de la planta de regeneració d'Arrato, proveïda d'un sistema de tractament idèntic a l'exigut pel títol 22 del Codi de l'aigua de Califòrnia per a reg agrícola sense restriccions

obstant això, la coordinació institucional, la gestió econòmica i financera i l'explotació i el manteniment dels projectes de regeneració són també factors determinants de l'èxit d'un projecte de regeneració i reutilització de l'aigua.

L'aprofitament d'una aigua regenerada requereix normalment: 1) transportar-la des de la planta de regeneració fins al lloc d'utilització, 2) emmagatzemar-la o regular-la per a adequar el cabal subministrat per la planta als cabals consumits, 3) definir unes normes d'utilització de l'aigua que permetin minimitzar els possibles riscos directes o indirectes per al medi ambient, les persones que la utilitzen, la població de l'entorn del lloc d'ús i els consumidors de qualsevol producte cultivat amb l'aigua regenerada. Aquests tres elements tècnics formen part dels programes de reutilització planificada d'aigua residual.

1.1

Beneficis de la reutilització planificada

El balanç hídric d'una zona geogràfica s'obté com a diferència entre l'aportació anual d'aigua, constituïda per les precipitacions i les aportacions dels aquífers i transvasaments de les altres conques, i les pèrdues anuals d'aigua —o pèrdues irrecuperables— la destinació de les quals és l'atmosfera o el mar. Qualsevol actuació destinada a conservar aigua que aconsegueixi reduir aquestes pèrdues irrecuperables ha de millorar la disponibilitat d'aigua per al seu aprofitament durant tot l'any. Per això, la regeneració i reutilització de l'aigua residual només resultarà en un increment real dels recursos hídrics aprofita-

bles en una zona, si aquestes aigües residuals es perden actualment de manera irrecuperable, bé per abocament al mar des d'una població costanera o a través de l'evapotranspiració a zones de l'interior. Així i tot, la regeneració i reutilització d'aigua residual a zones de l'interior pot permetre, en qualsevol cas, una gestió més adequada dels recursos hídrics disponibles.

La reutilització planificada d'aigua residual pot tenir múltiples beneficis, entre els quals es poden destacar els següents (Asano 3 *et al.* 1991; D'Angelo 5, 1993; Mujeriego 1, 1990; Mujeriego i Sala 4, 1991; Paret i Elsner 7, 1993; Newnham 6, 1993; Sheik *et al.* 2, 1990):

1. La disponibilitat d'uns recursos hídrics nets addicionals. Els usos a què siguin destinats aquests recursos determinarà el nivell de qualitat aplicable a l'aigua regenerada.
2. Una disminució dels costos de tractament i d'abocament de l'aigua residual. La reutilització d'una aigua residual oferirà un clar avantatge econòmic quan les exigències de qualitat de l'alternativa de reutilització considerada siguin menys restrictives que les definides per als objectius de qualitat del medi receptor en el qual normalment es feia l'abocament d'aquesta aigua residual.
3. Una reducció de l'aportació de contaminants als cursos naturals de l'aigua, en particular quan la reutilització s'efectua mitjançant reg agrícola, de jardineria o forestal. La reutilització d'aigua residual mitjançant reg permet que les substàncies orgàniques difícils de mineralitzar puguin ser degradades biològicament durant la seva infiltració a través del terreny de

cultiu, on els components minerals seran posteriorment assimilats per les plantes.

4. L'ajornament, la reducció o, fins i tot, la supressió d'instal·lacions addicionals de tractament d'aigua d'abastament, amb la consegüent reducció que això comporta tant dels efectes desfavorables sobre els cursos naturals d'aigua com dels costos d'abastament d'aigua.
5. Un estalvi energètic en evitar la necessitat d'aportacions addicionals d'aigua des de zones més allunyades de la planta de regeneració d'aigua.
6. Un aprofitament dels elements nutritius continguts a l'aigua, especialment quan l'aigua regenerada és utilitzada per al reg agrícola i de jardineria.
7. Una major fiabilitat i regularitat del cabal d'aigua disponible. El flux d'aigua residual és generalment molt més fiable que el de la majoria dels canals naturals d'aigua, especialment a les zones semiàrides com les costes mediterrànies espanyoles.

1.2

Exigències de la reutilització planificada

Un dels factors determinants de la implantació i el desenvolupament de la reutilització planificada de l'aigua residual és l'establiment d'unes normes de qualitat de l'aigua per a cadascun dels possibles tipus d'aprofitament que es prevegin. Entre la gran varietat de substàncies que s'incorporen a l'aigua durant la seva utilització urbana, industrial o agrícola, es poden esmentar



Camp de golf Mas Nou, regat amb aigua regenerada de la planta depuradora de Castell-Platja d'Aro. L'existència de zones residencials a prop del camp de golf fa que la qualitat sanitària de l'aigua de reg hagi de ser comparable a la de l'aigua d'abastament públic

les sals dissoltes, els elements nutritius, els microorganismes patògens, les substàncies inorgàniques tòxiques i bioacumulables en els microcontaminants orgànics (Asano *et al.* 4, 1991; Asano i Mills 3, 1990; OMS 1, 1989; USEPA 5, 1992; WPC 2F, 1989).

Per tal de mantenir una aigua regenerada de la millor qualitat possible, un criteri generalment adoptat és recórrer a efluents de caràcter urbà, com a primera alternativa, deixant els efluents de tipus industrial només per a casos excepcionals. Seguint aquest mateix criteri, la reutilització sol plantejar-se preferentment amb els cabals d'aigües brutes que tenen un major component d'aigua domèstica.

Per a assegurar que, a la planta de regeneració, no hi arribin contaminants imprevistos que puguin perjudicar o impedir el projecte de reutilització, és essencial establir un rigorós programa de control d'abocaments que inclogui des d'una ordenança d'abocaments fins a un programa d'educació ciutadana a fi d'evitar que s'incorporin a la xarxa de sanejament compostos indesitjables, tant per a la integritat de la mateixa xarxa de clavegueram com per al procés de tractament o el projecte de reutilització.

El transport d'aigua regenerada des de la planta de tractament fins al punt de reutilització és una exigència de qualsevol projecte de reutilització. Això requereix sovint la construcció d'un emissari terrestre i d'una doble xarxa de distribució, especialment quan es tracta de reutilització en zones urbanes. Per motius econòmics, la implantació d'una doble xarxa de distribució se sol realitzar de manera progressiva, començant

pels grups d'usuaris amb major consum total d'aigua i estenent-la més endavant a les altres zones de desenvolupament urbà posterior o amb consums d'aigua menors.

Les normes d'utilització de l'aigua regenerada són un component essencial de qualsevol estratègia de protecció de la qualitat ambiental i de la salut pública. En general, com més escasses són les restriccions imposades al consum de l'aigua pel que fa al possible contacte amb persones, animals o productes combustibles, major és el nivell de qualitat exigida a l'aigua regenerada. Així, mentre que la utilització d'aigua regenerada per al reg de jardineria per aspersió a les zones d'ús públic sol exigir una filtració i una desinfecció de l'efluent secundari, el reg agrícola mitjançant emissors soterrats es pot realitzar amb aigua residual sotmesa únicament a un tractament mecànic destinat a evitar l'obturbació freqüent dels orificis de sortida de l'aigua.

Les autoritats sanitàries dediquen especial atenció a la definició de les normes d'utilització de l'aigua regenerada, tals com: 1) la senyalització mitjançant cartells ben visibles en els quals s'indiqui el tipus d'aigua utilitzada, 2) l'adopció normalitzada del color morat per a les canonades i els dispositius de control, 3) la instal·lació de dispositius antiretorn, 4) les inspeccions de les connexions a la xarxa d'aigua regenerada, 5) l'exigència de determinats horaris de reg i de tipus d'aspersors, 6) la prohibició d'instal·lar aixetes exteriors i 7) la utilització de canonades i de boques de connexió de mànegues de mida diferent de la de les utilitzades

per a les aigües d'abastament públic. En relació amb això, l'aparició progressiva de comptadors al punt de connexió domiciliària constitueix una indicació clara de l'objectiu essencial d'aquests sistemes de distribució: optimitzar l'aprofitament de l'aigua, en comptes d'evacuar-la i abocar-la, mitjançant el reg.

1.3

Fiabilitat del procés de regeneració

Un aspecte característic dels projectes de regeneració d'aigua és la necessitat d'assegurar una fiabilitat notable del procés de tractament i una gestió adequada del sistema de reutilització de l'aigua. El fet que la reutilització de l'aigua residual es plantegi habitualment com l'única font d'aigua alternativa per a l'aprofitament considerat, sense la protecció que pot oferir la dilució amb aigua de més qualitat, i sobretot el fet que la reutilització d'una aigua comporti en molts casos la possibilitat d'un contacte directe amb persones, animals o vegetals que poden veure's afectats en la seva salut o el seu desenvolupament, obliguen a preveure plantes de regeneració d'aigua residual d'una elevada fiabilitat. Aquest fet constitueix un element essencial tant en la concepció com en l'explotació i el manteniment d'aquestes plantes.

La fiabilitat dels processos de tractament passa així a constituir un element essencial de la concepció i l'explotació del sistema de reutilització, amb prioritat sobre el rendiment i l'eficàcia dels mateixos processos, que han de satisfer els límits de qualitat establerts per a l'efluent. Entre



Llacuna d'infiltració ràpida per a la recàrrega d'aqüífers. Projecte Apricot, desenvolupat per la ciutat d'Orlando i el comtat d'Orange, a Florida, per a la recàrrega d'aqüífers i el reg de cítrics. La capacitat inicial del projecte va ser de 100.000 m³/dia, per a regar 3.200 ha de cítrics i recarregar l'aqüífer mitjançant seixanta llacunes de 100 m per 50 m cadascuna

les exigències relatives a la fiabilitat del procés de regeneració es poden destacar la instal·lació de controls continus de determinats paràmetres, la instal·lació d'alarmes i automatismes, la disponibilitat de peces de recanvi, la duplicitat d'equipaments i processos, l'existència d'equipaments d'entrada en funcionament automàtic en cas d'avaría, l'existència de volums de reactius de reserva, especialment de desinfectant, i la instal·lació d'equipaments autogeneradors o la duplicació de subministraments d'energia elèctrica.

Per a evitar que la utilització d'una aigua inadequadament regenerada pugui provocar un risc ambiental i sanitari inacceptable, les normes de regeneració solen exigir la instal·lació de llacunes d'emmagatzematge per a desviar-hi l'efluent inadequadament tractat fins que sigui processat, o bé d'un sistema alternatiu d'abocament.

En definitiva, la regeneració d'aigua residual es concep actualment com un procés destinat a obtenir un producte de qualitat. L'elaboració i la comercialització d'aquest producte han de plantejar-se en un marc més ampli que el tradicional de lluita contra la contaminació i amb una nova mentalitat en la concepció i explotació dels processos de regeneració, diferent de l'adoptada generalment en el tractament d'aigua residual, el resultat final del qual se sol considerar com un residu líquid o sòlid. Aquesta nova manera de plantejar la regeneració d'aigua residual ha fet que la reutilització planificada d'aigua residual passi a ser un element essencial de la gestió integral dels recursos hídrics.

1.4

Tipus de reutilització

L'aigua residual regenerada s'està utilitzant en múltiples camps, entre els quals destaquen: 1) reutilitzacions urbanes (jardineria, incendis, rentat de carrers i automòbils), 2) reutilització industrial (refrigeració), 3) reutilitzacions agrícola i forestal, 4) reutilitzacions ornamental i recreativa, 5) millora i preservació del medi natural i 6) recàrrega d'aqüífers.

La reutilització agrícola i de jardineria constitueix l'aprofitament més estès de l'aigua residual regenerada, tant per a cultius hortícoles (consum cru) com per a cultius amb processament posterior (cereals, cítrics i vinyes), i tant mitjançant reg per aspersió, microaspersió i degoteig, com mitjançant reg per inundació. La recàrrega d'aqüífers constitueix una alternativa de gran interès i aplicació a les zones costaneres, on la sobreexplotació d'aqüífers provoca sovint una reducció i el deteriorament dels recursos disponibles a causa de la intrusió salina.

La importància relativa dels diferents usos d'aigua regenerada guarda una estreta relació amb l'àmbit geogràfic considerat. Així, per exemple, mentre que el reg agrícola i de jardineria representava al voltant d'un 75 % de la reutilització d'aigua a Califòrnia el 1987 (CSWRCB, 1990), aquest mateix ús només significava un 30 % de l'aigua reutilitzada al comtat de Los Angeles el 1995 (SDLAC, 1995). D'altra banda, mentre que la recàrrega dels aqüífers representava un 15 % de l'aigua reutilitzada a Califòrnia el 1987, aquest mateix ús significava un 50 % de l'aigua reutilitzada al comtat de Los Angeles el 1995.

2

Reutilització per al reg agrícola i de jardineria

La reutilització d'aigua regenerada per a reg agrícola i de jardineria és una pràctica ben coneguda a molts indrets del món. Tot i això, la reutilització planificada per al reg agrícola i de jardineria només ha assolit una notable aplicació durant les últimes dècades als països desenvolupats i amb recursos hídrics tradicionalment abundants.

La publicació l'any 1984 per l'Estat de Califòrnia del "Manual práctico de riego con agua residual municipal regenerada", editat en castellà amb el patrocini de la Generalitat de Catalunya i la UPC (Mujeriego, 1990) constitueix el punt culminant del procés d'elaboració i posada a punt de criteris i normes de qualitat per al disseny, la construcció, el manteniment i l'explotació de projectes de reg amb aigua residual regenerada. A aquest treball de síntesi, caldria afegir-hi els resultats de l'estudi de demostració patrocinat per l'Estat de Califòrnia, amb una durada de cinc anys i un pressupost de set milions de dòlars, sobre el reg per aspersió amb aigua residual regenerada d'hortalisses de consum directe, dut a terme a la zona agrícola de Monterrey, Califòrnia (Sheikh et al., 1990).

Com a complement de tots aquests estudis, l'Agència de Protecció Ambiental dels EUA ha publicat un Manual titulat Guidelines for Water Reuse (USEPA, 1992), en el qual s'ofereixen directrius àmpliament documentades amb què



Zones d'infiltració dels marges del riu San Gabriel a la conca central del sud de Califòrnia. El volum màxim autoritzat de recàrrega artificial als aqüífers dels rius Hondo i San Gabriel és de 185 hm³ en tres anys consecutius, i de 74 hm³ en un any concret

els serveis municipals o regionals, i els organismes estatal i nacionals puguin promoure i desenvolupar de forma adequada i eficaç la reutilització planificada d'aigua residual. Aquestes directrius estan orientades principalment cap a la reutilització planificada en usos urbans no potables, en usos industrials i en usos agrícoles, sobre els quals a hores d'ara hi ha un gran consens pel que fa a la idoneïtat de l'aplicació. Així mateix, la Water Pollution Control Federation (1989) ha publicat un manual pràctic que recull els aspectes tècnics, econòmics i de gestió relatius a la reutilització d'aigua.

Els resultats d'aquests estudis i demostracions pràctiques han fet que, tant a Califòrnia com a d'altres estats del sud dels EUA i a països mediterranis com Israel, el reg amb aigua residual regenerada sigui considerat actualment com una alternativa addicional, i en alguns casos com l'única disponible, per a dur a terme una explotació agrícola de regadiu o un programa de jardineria urbana. La reutilització d'aigua per a reg de jardineria a les zones urbanes, tant d'ús públic com privat, ha passat a formar part de la gestió quotidiana dels recursos hídrics de nombrosos municipis de Califòrnia, Florida i altres estats del sud dels EUA; així mateix, el reg per aspersió d'hortalisses de consum cru en aquests mateixos estats constitueix una pràctica acceptada tant per les autoritats sanitàries com pels consumidors, que es basa en límits de qualitat obtinguts i confirmats mitjançant projectes d'investigació i de demostració, i de sistemes de supervisió

del disseny i explotació de les plantes de regeneració, coordinats per les autoritats de recursos hídrics, de protecció de la qualitat de l'aigua i de salut pública (Asano *et al.*, 1990, 1991; D'Angelo, 1993; Newnham, 1993; Paret i Elsner, 1993).

El "Manual de riego con agua residual municipal regenerada" (Mujeriego, 1990) constitueix una base de partida de gran utilitat per al disseny i l'explotació dels projectes de reutilització d'aigua regenerada. Al marge dels límits de qualitat sanitària establerts a Califòrnia, el Manual ofereix una metodologia científica i tècnica per enfocar possibles projectes de demostració de reutilització planificada d'aigua regenerada a les altres zones del món i, molt particularment, a les zones costaneres i interiors espanyoles. Aquesta metodologia ha de permetre establir els límits físics, químics i bacteriològics més apropiats en cada cas. A aquest respecte, la Generalitat de Catalunya ha patrocinat, juntament amb la UPC, el Consorci de la Costa Brava i la Zona Residencial Mas Nou, un estudi de demostració sobre la reutilització d'aigua regenerada per al reg de camps de golf, que ha permès definir criteris pràctics per al disseny i l'explotació d'aquest tipus de reutilització planificada (Mujeriego i Sala, 1991). Els resultats d'aquest estudi (Mujeriego *et al.*, 1994) han permès confirmar la factibilitat i eficàcia dels processos més comunament utilitzats a Califòrnia i Florida per a la reutilització d'aigua per a reg de jardineria; els resultats econòmics d'aquest estudi es presenten en un apartat posterior.

3

Reutilització per a la recàrrega planificada dels aqüífers

L'aplicació més freqüent de la recàrrega artificial, també denominada recàrrega planificada, és emmagatzemar aigua en els aqüífers quan es disposa d'excedents, amb l'objecte de poder satisfer la demanda en èpoques d'escassetat. El material utilitzat per a la redacció dels apartats relatius a la recàrrega planificada ha estat pres de la publicació Ground Water Recharge using Waters of Impaired Quality (National Research Council, 1994), que al seu torn constitueix una recopilació detallada i comentada dels estudis i les publicacions disponibles sobre aquest tema, entre els quals es poden destacar els realitzats per Asano (1985) i per la USEPA (1992), i els continguts en les actes de conferències especialitzades com les patrocinades per l'American Water Works Association i la Water Environment Federation, o el grup especialitzat en regeneració i reutilització d'aigua de la IAWQ (Mujeriego i Asano, 1992; Asano i Mujeriego, 1994).

L'aigua obtinguda dels projectes de recàrrega artificial es destina generalment a usos no potables, com el reg de jardineria, alliberant així els altres recursos que poden ser utilitzats en usos més exigents; en condicions apropiades i quan no es disposa de fonts d'abastament millors, l'aigua obtinguda de la recàrrega artificial pot constituir també una font d'abastament d'aigua potable. La recàrrega artificial pot utilitzar-se també per al control de la intrusió salina en aqüífers costaners, limitar la subsidència del terreny

produïda pel descens dels nivells piezomètrics, mantenir els nivells mínims en cursos superficials d'aigua i augmentar els nivells piezomètrics amb l'objectiu de reduir els costos de bombament de les aigües subterrànies.

A mesura que es reconeixen els beneficis de la recàrrega artificial d'aqüífers, els gestors dels recursos d'aigua han buscat fonts d'aigua alternatives per efectuar la recàrrega, especialment aigües de qualitat inferior a la considerada normalment acceptable per a usos d'abastament urbà o potables. Entre aquestes fonts alternatives mereixen destacar-se: 1) l'aigua residual municipal tractada, 2) l'aigua d'escorriment i 3) les aigües de retorn de reg.

A més dels aspectes quantitius, la recàrrega artificial és un procés mitjançant el qual una aigua experimenta una sèrie de tractaments successius que en canvien la composició. Els paràmetres de qualitat que poden suscitar alguna inquietud depenen no solament de les característiques del tipus d'aigua utilitzada, sinó també del tractament a què és sotmesa abans de la recàrrega (pretractament), dels canvis que tenen lloc a mesura que l'aigua s'infiltra a través del sòl i de l'aqüífer (tractament sòl-aqüífer) i del tractament a què pot sotmetre's l'aigua un cop estreta de l'aqüífer (posttractament).

3.1 Origen de l'aigua i tipus de tractament

La qualitat de l'aigua utilitzada per a la recàrrega d'aqüífers té una implicació directa sobre l'explotació de les instal·lacions de recàrrega i sobre l'ús final a què es destini l'aigua recuperada. En general, els paràmetres de qualitat que més repercussió tenen en la concepció i explotació de les instal·lacions de recàrrega són la matèria en suspensió, els gasos dissolts, els nutrients, la demanda bioquímica d'oxigen, els microorganismes i la taxa d'adsorció de sodi, per raó dels seus efectes sobre la permeabilitat del sòl. Els paràmetres de qualitat que tenen més efectes potencials quan es planteja la reutilització com a aigua potable són les substàncies tòxiques orgàniques i inorgàniques, els compostos nitrogenats i els microorganismes patògens.

Dels tres tipus d'aigua de qualitat inferior generalment considerats, l'aigua residual municipal depurada és, amb gran diferència, la més estable tant espacialment com temporalment, i tant en termes de quantitat com de qualitat. Una excepció freqüent a aquesta regla és el cas de xarxes de sanejament unitàries en les quals es barregen les aigües residuals i les aigües d'escorriment, o en les quals pot incorporar-se algun abocament d'aigües industrials. Tot i que els principals parà-

metres de qualitat de les aigües residuals municipals han estat estudiats extensament, es disposa de menor informació sobre els elements traça. Entre els components que poden suscitar inquietud en aquest tipus d'aigües es poden esmentar els compostos orgànics, les espècies nitrogenades, el fòsfor, els microorganismes patògens i la matèria en suspensió.

Es disposa de processos de tractament capaços d'assolir uns nivells de qualitat de l'efluent suficients per a les diverses formes de recàrrega; no obstant això, fins i tot després d'un alt grau de tractament, un efluent que ha estat desinfectat amb clor contindrà subproductes de la desinfecció que poden suscitar una certa inquietud si l'aigua recuperada de l'aqüífer es pensa utilitzar per a abastament d'aigua potable. L'adopció de formes alternatives de desinfecció, amb radiació ultraviolada per exemple, hauria de significar, sens dubte, un avanç significatiu en la supressió d'aquesta problemàtica.

3.2 Tractaments al sòl i a l'aqüífer

La suposició freqüent que el pas de l'aigua a través del sòl fins a la zona saturada, i durant el seu recorregut pel mateix aqüífer fins al punt d'extracció, no proporciona cap tractament és una hipòtesi molt conservadora amb relació a la majoria de compostos químics i microbiològics. Tant la zona de sòl no saturat com la zona saturada de l'aqüífer tenen una gran capacitat per a eliminar contaminants i microorganismes patògens de l'aigua utilitzada per a la recàrrega. El tipus de sòl ideal per a dur a terme el tractament sòl-aqüífer ha d'equilibrar l'exigència d'una alta taxa de recàrrega, pròpia dels sòls de gran porositat, amb la necessitat d'aconseguir un alt rendiment d'adsorció i eliminació, propi dels sòls d'escassa porositat i textura fina.

La zona de sòl no saturat pot tenir un paper important en la recàrrega artificial: pot eliminar o reduir els components químics i biològics presents a l'aigua de qualitat inferior utilitzada per a la recàrrega, a mesura que aquesta s'infiltra cap a l'aqüífer, contribuint així a reduir els riscos sanitaris potencials abans que l'aigua arribi a incorporar-se al mateix aqüífer. El nitrogen amoniacal, per exemple, es transforma ràpidament en nitrat que és molt mòbil en les condicions normals d'un sòl, però que pot ser eliminat mitjançant desnitrificació en condicions anaeròbies. La presència de fòsfor pot reduir-se per adsorció i precipitació, per bé que no totalment. Els metalls pesants, a excepció del bor, són fortament atenuats i precipitats al sòl, especialment sota condicions aeròbies i alcalines. Els compos-

tos orgànics són eliminats en diverses proporcions mitjançant volatilització o degradació química i biològica durant el seu pas a través de la zona de sòl no saturat.

Alguns microorganismes patògens grossos són eliminats per filtració, mentre que els bacteris i els virus poden ser eliminats per adsorció. Desgraciadament, els processos d'eliminació no són totalment eficients en condicions naturals, i no tots els components són eliminats o retinuts en el mateix grau. A més, les alternatives de gestió que contribueixen a millorar la capacitat hidràulica o l'eliminació d'un compost químic o un microorganisme patògen poden de fet reduir l'eficiència d'eliminació d'un altre component.

Una gestió i un seguiment adequats del sistema de tractament sòl-aqüífer pot reduir significativament els costos de pretractament i posttractament. Una alternança adequada dels cicles d'ompliment i assecatge d'un sistema d'infiltració pot minimitzar el curullament d'un sistema sòl-aqüífer i aconseguir que es mantingui en funcionament indefinidament. No obstant això, el moviment lent de components traça continua essent un motiu de preocupació; la presència d'aquest tipus de compostos exigeix un seguiment acurat durant l'explotació i una regulació adequada aplicable després de la clausura de la instal·lació. Tot i que la vigilància superficial és desitjable per a aconseguir un seguiment adequat, la variabilitat del sòl fa molt difícil aconseguir una avaluació completa amb els dispositius disponibles actualment. La millor solució s'aconsegueix amb un seguiment combinat tant de la superfície del sòl com de punts més allunyats del mateix aqüífer.

3.3 Aspectes sanitaris

Una de les consideracions més importants a l'hora d'utilitzar aigües de qualitat inferior per a la recàrrega d'aqüífers és la possible presència a l'aigua de recàrrega de components químics o microbiològics que puguin ser perillosos per a la salut pública. Aquestes preocupacions són aplicables tant en el cas de la utilització de l'aigua per a usos potables com en el cas d'exposició humana indirecta que pot produir-se mitjançant usos de l'aigua que no requereixen el nivell d'aigua potable; no obstant això, la possible exposició i, per tant, el risc associat a una reutilització no potable és significativament inferior. Tot i que es disposa de considerables coneixements sobre el comportament d'aigües poc contaminades (fonts convencionals d'aigua) existeix encara una certa inquietud sobre els riscos associats amb

aigües de qualitat inferior, associats principalment amb la presència de compostos orgànics sintètics, subproductes de la desinfecció i diversos microorganismes patògens.

La valoració del risc sanitari que pot comportar la recàrrega artificial requereix determinar i avaluar els riscos relatius que això representa i definir les estratègies més apropiades d'utilització i explotació de la recàrrega que minimitzin aquests riscos. Una de les qüestions principals a tenir en compte és el grau de tractament a què pot ser necessari sotmetre l'aigua utilitzada per a la recàrrega. Una altra qüestió bàsica, igualment important en el cas de les fonts convencionals d'aigua, és la necessitat de reduir la possible exposició dels usuaris no tan sols a microorganismes patògens sinó també a certs subproductes de la desinfecció.

El comportament i la destinació final dels microorganismes, dels subproductes de la desinfecció i d'alguns altres compostos químics tòxics dins de l'aquífer determinaran, sens dubte, les seves concentracions en el punt d'extracció de l'aigua. Per aquestes raons, el coneixement de la composició química i microbiològica de l'aigua utilitzada per a la recàrrega i dels canvis que aquesta pot experimentar en el medi aquàtic subterrani és un factor essencial per a poder utilitzar de forma apropiada una aigua de qualitat inferior per a la recàrrega artificial.

La reducció dels subproductes de la desinfecció durant el pretractament permet reduir els riscos associats. No obstant això, quan es comparen els riscos derivats de la presència de subproductes de la desinfecció amb els beneficis derivats de la desinfecció química, cal assenyalar la importància crítica que té realitzar la desinfecció de l'aigua. La possible taxa de mortalitat induïda per una desinfecció inadequada d'una aigua d'abastament sobrepassa en molts ordres de magnitud els riscos d'afeccions cancerígenes associades amb la presència de subproductes de la desinfecció.

S'han realitzat estudis detinguts dels efectes derivats de la utilització d'aigua obtinguda de recàrrega artificial per a abastament d'aigua potable. Cap d'aquests estudis no ha detectat efectes significatius associats amb la presència de compostos químics o microorganismes infecciosos, tot i que les limitacions metodològiques i el grau de seguiment assolit en aquests estudis no permeten assegurar amb total certesa la inexistència d'efectes sanitaris associats amb el consum humà d'aigües obtingudes de projectes de recàrrega amb aigües de qualitat inferior, especialment quan aquest consum es prolonga per llargs períodes de temps. La informació obtinguda en estudis de laboratori i en projectes reals

no indica que els riscos sanitaris associats amb l'aigua recuperada siguin superiors als associats amb aigües de fonts d'abastament convencionals, ni que les concentracions de compostos químics i microorganismes patògens siguin aparentment superiors a les establertes en les normes de qualitat de l'aigua potable.

4 La reutilització a les zones costaneres. Costos d'explotació i manteniment

El desenvolupament urbà, turístic i agrícola actual, especialment a les zones costaneres espanyoles, comporta un important consum d'aigua, tant per a satisfer els consums domèstics associats com per a atendre les demandes d'una creixent extensió de zones enjardinades i agrícoles que serveixen de marc lúdic i comercial. La gestió dels recursos hídrics en aquestes condicions es planteja amb dos objectius complementaris: 1) la utilització racional de l'aigua, evitant els consums excessius i 2) la reutilització d'aigua residual per a usos no potables, especialment la jardineria i l'agricultura, i per a usos potables indirectes, com la recàrrega d'aquífers; tots promouen la creació neta de noves dotacions d'aigua i eviten el deteriorament de les aigües costaneres. Entre les actuacions més adaptades a cadascun d'aquests objectius es poden esmentar, per un costat, l'educació i la informació ciutadana i la reglamentació i les tarifes progressives i, per un altre costat, la regeneració i reutilització d'efluents d'aigua residual.

Les zones costaneres espanyoles es caracteritzen pel relatiu ajustament entre les majors produccions d'aigua residual que es registra durant la temporada estival i la màxima demanda d'aigua per a reg agrícola i de jardineria que es produeix en aquesta mateixa estació. Al marge de les exigències tècniques i financeres que aquestes demandes estacionals plantegen tant en el sistema d'abastament d'aigua com en el de tractament i abocament d'aigua residual, la reutilització d'aigua residual a les zones costaneres ofereix clars avantatges econòmics i ambientals en les seves diverses alternatives: 1) reg de jardineria, amb el que comporta de millora de les condicions de vida, de l'aspecte estètic i del caràcter lúdic de la zona, 2) reg agrícola, com a font de recursos econòmics de gran interès i 3) recàrrega d'aquífers costaners i de zones humides, com a forma de protecció de recursos naturals de gran atractiu i valor ambiental.

Tot i que la reutilització d'aigua residual a les zones de l'interior no permet la creació neta de nous recursos hídrics, sí que ofereix la possibili-

tat d'una millor gestió de l'aigua, mitjançant la substitució d'aigua potable de consum públic per aigua residual regenerada per a aquells usos en què no sigui necessària aigua potable. Convé assenyalar finalment que una instal·lació de regeneració d'aigua residual destinada al reg agrícola i de jardineria d'una zona turística espanyola passaria a convertir-se en un estàndard tecnològic i de prestigi de primera magnitud a tot el sud d'Europa i a la regió mediterrània, i li conferiria una posició d'avantguarda en aquesta faceta tan important de la gestió dels recursos hídrics.

La manca d'instal·lacions de regeneració d'aigua residual a les zones de característiques socioeconòmiques com les espanyoles no permet oferir estimacions precises dels seus costos d'explotació i manteniment. Com a referència esmentarem les estimacions obtingudes en el projecte de demostració de reg de camps de golf amb aigua regenerada (Mujeriego *et al.*, 1994) on el cost de desinfecció amb hipoclorit d'un efluent biològic decantat és de 5,5 PTA/m³, i l'estalvi per aportació de fertilitzants arriba a 14 PTA/m³.

El Consorci de la Costa Brava està subministrant aigua regenerada al camp de golf Mas Nou, a Castell-Platja d'Aro (Girona), per un import aproximat de 12 PTA/m³ durant l'any 1995. Aquest cost inclou la desinfecció, el seguiment de la qualitat de l'aigua als llacs ornamentals i la informació detallada sobre el contingut de fertilitzants de l'aigua regenerada. D'altra banda, dades facilitades per l'empresa explotadora de la planta de regeneració de la ciutat de Vitòria (Diputació Foral d'Àlaba, 1995) per a l'any 1995 indiquen un cost aproximat de 9 PTA/m³ d'aigua regenerada.

Des del punt de vista econòmic i legal, l'aspecte essencial és la necessitat de definir el règim de drets o concessions tant per a les aigües utilitzades per a la recàrrega com per a les aigües extretes de l'aquífer. Tot i que als Estats Units hi ha lleis que regeixen certs aspectes del procés de recàrrega, l'opinió del National Research Council (1994) és que el Govern federal dels EUA no ha exercit un lideratge suficient per a desenvolupar institucions adequades que s'encarreguin de l'abocament i la reutilització de les aigües residuals.

Un altre possible condicionant és la percepció del públic. L'actitud del públic és un factor molt important que no es pot ignorar, ja que el públic és, en definitiva, el receptor de l'aigua recuperada i, en última instància, tot i que de forma indirecta, és qui ha de fer-se càrrec dels costos de les actuacions. La planificació d'un sistema de recàrrega artificial, especialment quan s'han d'utilitzar aigües de qualitat inferior, requereix la participació del públic des de les seves primeres

fases, a fi de contribuir a una millor comprensió de tots els aspectes involucrats.

Una anàlisi comparativa dels costos de l'aigua potable i de l'aigua regenerada utilitzada per a la recàrrega artificial al Comtat de Los Angeles (SDLAC, 1995) posa de manifest que el cost de l'aigua regenerada se situa entre un 15 i un 72% del cost de l'aigua potable. Aquesta variació tan considerable, tant de l'aigua potable com de l'aigua regenerada, és conseqüència del règim legal de la propietat de l'aigua a Califòrnia, així com de l'antiguitat de les infraestructures, la localització geogràfica i els altres factors financers i específics de cada zona concreta.

Conclusions

L'anàlisi realitzada en els apartats precedents permet formular les conclusions següents:

1. La reutilització planificada d'aigua residual s'ha convertit en un component essencial de la gestió integral dels recursos hídrics, especialment a les zones costaneres, on pot contribuir de forma significativa a l'augment net d'aquests recursos, tant per a la seva utilització directa com a través de la purificació i emmagatzematge en aqüífers costaners.
2. Tot i que els criteris i les normes de qualitat establerts per a diferents usos de l'aigua regenerada són variats i heterogenis, es disposa de prou experiència per a planificar, projectar i explotar sistemes de reutilització d'aigua residual econòmics i segurs, tant des del punt de vista sanitari com ambiental.
3. La regeneració d'aigua residual es concep actualment com un procés destinat a obtenir un producte de qualitat. L'elaboració i comercialització d'aquest producte ha de plantejar-se en un marc més ampli que el tradicional de lluita contra la contaminació i amb una nova mentalitat en la planificació, concepció i explotació dels processos de regeneració diferent de l'adoptada generalment en el tractament d'aigua residual.
4. La utilització d'aigua residual regenerada per a reg agrícola i de jardineria ofereix una alternativa pràctica de gran interès per al tractament i abocament de l'aigua residual.
5. Amb l'aplicació d'un procés de pretractament, d'un tractament sòl-aqüífer, i d'un procés de posttractament apropiats al tipus de font i ús de l'aigua, les aigües de qualitat inferior poden utilitzar-se per a la recàrrega artificial d'aqüífers.
6. La recàrrega artificial mitjançant aigua de qualitat inferior és una alternativa vàlida quan es tracta de controlar la intrusió salina, reduir la subsidència del terreny, mantenir els nivells

mínims dels cursos d'aigua o unes altres aplicacions similars. L'aigua recuperada és especialment adequada per a usos no potables, com el reg de jardineria, ja que els riscos sanitaris associats són mínims i el grau d'acceptació del públic és elevat.

7. Quan l'aigua extreta ha de ser utilitzada per a usos potables, els riscos sanitaris i les precaucions necessàries són majors. No obstant això, quan les fonts d'aigua de qualitat superior no són econòmicament assequibles o són insuficients, l'aigua obtinguda d'un sistema de recàrrega artificial pot ser una alternativa adequada com a font d'abastament d'aigua potable.
8. Els projectes de demostració dels diferents tipus de reutilització planificada d'aigua residual contribueixen al desenvolupament i a l'acceptació d'aquestes tècniques, faciliten la comprovació de la seva capacitat per a aportar recursos hídrics i per al reciclatge d'elements nutritius, i asseguren la qualitat sanitària i ambiental.
9. La implantació d'un projecte de reutilització planificada d'efluents a qualsevol zona espanyola passaria a convertir-se en un estàndard tecnològic i de prestigi de primera magnitud a tot el sud d'Europa i la regió mediterrània, i li conferiria una posició d'avantguarda en aquesta faceta tan important de la gestió dels recursos hídrics ■

REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION AND WATER ENVIRONMENT FEDERATION (1996). *Water Reuse Conference Proceedings, San Diego, California*. American Water Works Association, Denver, Colorado.

ASANO, T., EDITOR (1985). *Artificial Recharge of Groundwater*. Butterworth Publishers.

ASANO, T. I R. MUJERIEGO (1994). *Water Quality Guidelines for Wastewater Reuse*. Comunicacions de les Jornades Tècniques sobre Biosòlids i Aigües Depurades com a Recursos, R. Mujeriego i L. Sala (Editors). Universitat Politècnica de Catalunya i Consorci de la Costa Brava.

ASANO, T., D. RICHARD, R.W. CRITES I G. TCHOBANOGLOUS (1991). "Evolution of tertiary treatment requirements in California". *Water Environment and Technology*. vol. 4, núm. 2.

ASANO, T. I R.A. MILLS (1990). "Planning and Analysis for Water Reuse Projects". *Journal of the American Water Works Association*. Gener de 1990.

D'ANGELO, S. (1993). "REUSING WATER IN THE NINETIES". *Water Environment and Technology*, vol 5, núm. 2.

DIPUTACIÓN FORAL DE ALAVA, GOBIERNO VASCO I AGUAS MUNICIPALES DE VITORIA (1995). *Plan de Recuperación i Reutilización Integral de las Aguas Residuales de Vitoria-Gasteiz*. Diputación Foral de Alava, Vitoria.

MUJERIEGO, R. (EDITOR) (1990). *Manual Práctico de Riego con Agua Residual Municipal Regenerada*. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

MUJERIEGO, R. I T. ASANO, EDITORES (1991). "Wastewater Reclamation and Reuse". *Water Science and Technology*, vol. 24. International Association on Water Quality.

MUJERIEGO, R. I L. SALA (1991). "Golf course irrigation with reclaimed wastewater". *Wastewater reclamation and reuse*. *Water Science and Technology*, vol. 24, núm. 9. International Association on Water Pollution Research and Control, Pergamon Press.

MUJERIEGO, R., L. SALA, J. GARCÍA I M. CARBÓ (1994). *Gestió de l'Aigua Residual Regenerada Utilitzada per a Regar el Camp de Golf Mas Nou. Quarta Memòria Semestral i Informe Final*. Junta de Sanejament de la Generalitat de Catalunya. Barcelona.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1994). *Ground Water Recharge using Waters of Impaired Quality. Committee on Ground Water Research*. National Academy Press, Washington, D.C.

NEWNHAM, D.F. (1993). "Dual distribution systems". *Water Environment and Technology*, vol 5.

ORGANITZACIÓ MUNDIAL DE LA SALUT (1989). *Directrices Sanitarias sobre el Uso de Aguas Residuales en Agricultura i Acuicultura*. Serie d'informes tècnics 778. Ginebra, Suïssa.

PARET, M. I M. ELSNER (1993). "Reclaimed water perspectives". *Water Environment and Technology*, vol 5, núm. 2.

SANITATION DISTRICTS OF LOS ANGELES COUNTY (1995). *Annual Status Report on Reclaimed Water, Fiscal Year 1994-95*. Whittier, Califòrnia.

SHEIKH, B., R.P. CORT, W.R. KIRKPRATICK, R.S. JAQUES AND T. ASANO (1990). "Monterey Wastewater Reclamation Study for Agriculture". *Research Journal of the Water Pollution Control Federation*, vol. 62, núm. 3.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY AND UNITED STATES AGENCY FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT (1992). *Guidelines for Water Reuse*. EPA/625/R-92/004, September 1992. Center for Environmental Research Information, Cincinnati, Ohio.

WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION (1989). *Water Reuse (Second Edition)*. Manual of Practice SM-13. Virginia, Estats Units.