

CINÉTICA DE LA ELIMINACIÓN EN LA ZONA NO SATURADA DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO) EN AGUA RESIDUAL DEPURADA UTILIZADA PARA RIEGO.

DURÁN, A., MORELL, I. y HERNÁNDEZ, F.

*Grupo de Investigación de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
Departamento de Ciencias Experimentales. Universidad Jaume I.
Apdo. 224 . 12071. Castellón.*

Resumen

En el acuífero de la Plana de Castellón se ha llevado a cabo una experiencia controlada de riego con efluentes urbanos depurados con objeto de establecer la capacidad de depuración de la zona no saturada y la posible afección a la calidad del agua subterránea.

La citada experiencia se ha realizado en una parcela experimental equipada con muestreadores de cápsula de cerámica porosa para la obtención de muestras de agua intersticial a diferentes profundidades.

De entre los parámetros físico-químicos controlados se presta especial atención a la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), concretamente a la demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días (DBO₅) como parámetro de polución orgánica más utilizado y aplicable a aguas residuales y superficiales.

Se complementa el estudio de la DBO con la determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) que se emplea para medir el contenido de la materia orgánica tanto de las aguas naturales como de las residuales por vía de oxidación química (Dicromato potásico en medio ácido), así como también mediante el estudio de la llamada normalmente Materia Orgánica (oxidabilidad al permanganato) que es otro método de oxidación por vía química, (oxidante permanganato potásico en medio ácido).

Los resultados obtenidos evidencian que a lo largo de la zona no saturada se produce una notable disminución de la DBO, comportándose dicha zona como un filtro de alto poder de autodepuración.

Introducción

La mayoría de investigaciones en zona no saturada han sido encaminadas a estudiar la lixiviación de sustancias contaminantes que son aplicadas a la superficie del terreno y que dan lugar, una vez que alcanzan el acuífero, a la contaminación del agua subterránea.

No obstante, en el contexto sobre la reutilización de aguas residuales urbanas para riego, Esteller *et al.*, (1994) estudiaron el efecto depurador de la zona no saturada sobre efluentes urbanos utilizados para riego. Para llevar a cabo esta investigación se utilizó una metodología específica, basada en la toma de muestras de agua intersticial a diferentes profundidades, junto con el estudio de las características físicas y químicas

del terreno, acondicionándose para tal fin una planta experimental subdividida a su vez en varias parcelas, instalándose cápsulas de succión de cerámica porosa a diferentes profundidades.

Para el riego se utilizó agua residual depurada de la Estación Depuradora de Agua Residual (EDAR) de la ciudad de Castellón para algunas de las parcelas y para el resto agua subterránea.

En las publicaciones de Esteller y Morell (1993), Lapeña *et al.*, (1993) y Esteller *et al.*, (1994) se pone de manifiesto la existencia de una serie de procesos que provocan la disminución de la carga contaminante del agua infiltrada en profundidad después de efectuarse el riego de la parcela.

Con los datos obtenidos en la planta experimental, que abarcan un periodo desde el 2/11/92 hasta el 19/12/94, se ha tratado de comprobar la variación en profundidad de parámetros tan característicos del agua residual como la DBO, DQO y MO (Oxidabilidad al permanganato), estableciéndose siempre que ha sido posible la variación cuantitativa de estos parámetros a lo largo de la zona no saturada cuantificando de alguna manera la capacidad depuradora de la zona no saturada en el acuífero de la Plana de Castellón, y que responde a un modelo semejante a un lecho filtrante.

Descripción de la parcela y de la experiencia

La planta experimental está situada en las inmediaciones de la EDAR de la ciudad de Castellón, con una extensión de 50 metros cuadrados y ha sido subdividida en varias parcelas; en una de ellas, concretamente en la parcela C, con una extensión de 12 m² existen 9 cápsulas de succión a diferentes profundidades: 0,30 m (2 cápsulas) 0,60 m (2 cápsulas) 1,20 m (2 cápsulas) 1,80 m (2 cápsulas) y 2,40 m (1 cápsula).

El riego se realizó con agua residual depurada. La toma de muestras del agua intersticial de la zona no saturada se ha realizado mediante muestreadores de cápsulas de succión de cerámica porosa con un diámetro interno de 32 mm. y una longitud de 85 mm.

El muestreo de las cápsulas se llevó a cabo cinco días después del riego y de haber aplicado la succión.

Tanto en el agua residual depurada aplicada para riego como en cada una de las muestras obtenidas en las diferentes cápsulas, se ha determinado DBO, DQO y MO (Oxidabilidad al permanganato).

Introducción teórica

Los filtros percoladores o lechos filtrantes artificiales han sido muy estudiados en ingeniería de depuración de aguas residuales. En general, son un sistema de depuración biológica mediante oxidación de la materia

orgánica que se produce al hacer circular el agua residual a través de un medio poroso. Las sustancias contaminantes del agua y la materia orgánica se degradan en una película biológica compuesta por microorganismos que se desarrollan alrededor de los elementos constitutivos de la masa porosa. La película se forma por adherencia de los microorganismos a la citada masa porosa y a las partículas orgánicas (generalmente coloidales), creándose de esta manera la película.

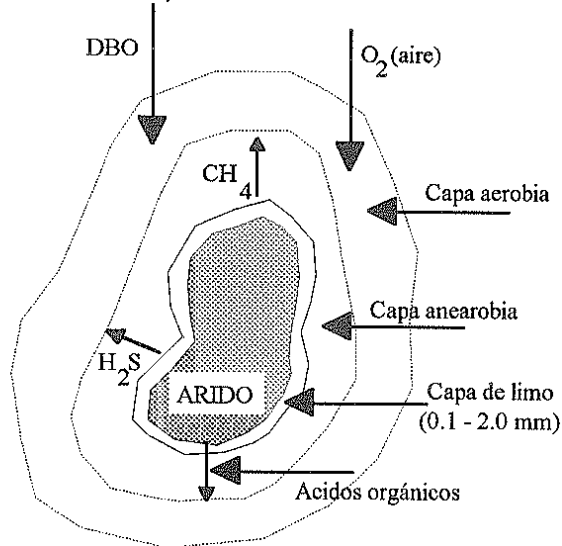


Figura 1. Modelo de película biológica (Hernández, 1992)

No hay que olvidar que los filtros percoladores que se utilizan desde 1893 (Inglaterra) estaban constituidos con relleno de piedra machacada que formaban el material poroso. Los rellenos utilizados actualmente, de materiales sintéticos con porcentajes de huecos conocidos, permiten espesores en profundidad de hasta 6 metros; normalmente la altura de la masa filtrante está comprendida entre 2 y 4 metros.

Los parámetros más importantes que determinan la eficacia del filtro son la superficie específica y el porcentaje de huecos. Sin embargo, el parámetro que en la práctica determina realmente la eficacia del filtro es la DBO₅ eliminada a través de él.

Los modelos de eliminación de la DBO en un lecho filtrante han sido estudiados por Velz (1948) y Eckenfelder (1963). En su aplicación a la zona no saturada se emplea el modelo de Velz, más sencillo matemáticamente y que puede describir los fenómenos de depuración que ocurren en esta zona.

Dicho modelo se basa en que el rendimiento en la eliminación de la DBO obedece a una ecuación del tipo:

$$\frac{A}{A_0} = e^{-K'x} \rightarrow A = A_0 \cdot e^{-K'x}$$

siendo A: valor de la DBO₅ a la profundidad x
 A₀: valor de la DBO₅ aplicada.

Ello supone que la velocidad de eliminación de la DBO con la profundidad responde a una ecuación del tipo:

$$v = \frac{dA}{dx} = -K' \cdot A$$

de donde:

$$\frac{dA}{A} = -K' dx \xrightarrow{\text{Integrando}} \int_{A_0}^A \frac{dA}{A} = -K' \int_0^x dx$$

resolviendo estas integrales:

$$\ln A - \ln A_0 = -K'x \rightarrow \ln \frac{A}{A_0} = -K'x \rightarrow \frac{A}{A_0} = e^{-K'x}$$

Si se utilizan logaritmos decimales:

$$\text{Log} \frac{A}{A_0} = -\frac{K'}{2.303}x$$

llamando: $k = \frac{K'}{2.303}$

$$\text{Log} \frac{A}{A_0} = -kx ; \frac{A}{A_0} = 10^{-Kx} ; A = A_0 10^{-kx}$$

El significado de la constante k:

$$\text{Log} A - \text{Log} A_0 = -kx \rightarrow k = \frac{\log A_0 - \log A}{x} = \frac{-\Delta \log A}{x}$$

Si "x" viene dado en metros, para $x = 1$ m. $k = -\Delta \log A$, es decir, es el descenso logarítmico por metro de la DBO midiéndose en m^{-1} . A k se le denomina tasa de depuración.

Según el NRC (National Research Council. U.S.A.) para determinar el rendimiento (R%), se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Rendimiento} = \frac{A_0 - A}{A_0} \cdot 100$$

Y en virtud de la ecuaciones anteriores:

$$R = \frac{A_0 - A_0 \cdot 10^{-kx}}{A_0} \cdot 100 = 100(1 - 10^{-kx})$$

$$\%R = 100(1 - 10^{-kx})$$

fórmula que permite hallar el % de DBO eliminada conociendo el valor de k. O viceversa, partiendo de la anterior fórmula se llega a:

$$k = -\frac{1}{x} \log(100 - R) + \frac{2}{x}$$

Es decir, conociendo x (profundidad) y R% se puede calcular el valor de k.

La zona no saturada como lecho filtrante. Factores que influyen.

Varios son los motivos que permiten considerar a la zona no saturada como un lecho filtrante.

1º) Por su característica puramente hidrológica es un medio poroso en el que coexisten fase acuosa (agua intersticial) y diversas fases gaseosas que tienen importantes consecuencias en los procesos microbianos.

La presencia de distintos gases es una característica de la zona no saturada. Los gases más abundantes son aquellos que se encuentran en la atmósfera, nitrógeno, oxígeno y dióxido de carbono, teniendo presente que una elevada actividad bacteriana puede extraer oxígeno de la zona no saturada e incrementar el CO₂ hasta un 19% (Chapelle 1993); por tanto en este aspecto su comportamiento es semejante a un filtro artificial percolador, en donde el intercambio de gases y en general la aireación está garantizada por el diseño de la instalación.

2º) La zona no saturada es un hábitat microbiano y los procesos debidos a los microorganismos son importantes por diversas razones:

a) Los procesos bacterianos como el consumo de oxígeno, producción de CO₂, nitrificación y desnitrificación impactan directamente en la química del agua.

b) Los componentes antropogénicos (hidrocarburos del petróleo y otros compuestos), que presentan actividad biológica, es decir, influyen en el metabolismo intermediario de las bacterias, afectan a su transporte.

3º) Desde el punto de vista de la distribución de microorganismos a lo largo de la zona no saturada, concretamente de la distribución de bacterias, la zona no saturada no puede considerarse uniforme, sino que los distintos investigadores que han estudiado su reparto (Waskman 1932, Alexander 1977 y Balkwill-Ghiorse 1985), se pueden distinguir tres zonas cuya extensión varía según la litología y textura de la zona no saturada que se trate, a saber:

A) *Zona de suelo (Soil Zone)*: Parte más superficial cuya profundidad depende de las características geológicas y puede oscilar en términos generales desde 30 cms. a 1 metro. Fuertemente aireada con gran intercambio de gases y abundante población bacteriana y por tanto influye notablemente en los procesos de depuración del agua infiltrada.

B) Zona intermedia (Intermediate Zone): Varía en profundidad de un lugar a otro según las características del terreno. Ha sido investigada por Balkwill-Ghiorse (1985), observando cargas bacterianas de 10^6 a 10^7 colonias por gramo de sedimento seco y varios tipos de bacterias con crecimiento medio. Es significativo que los tipos de bacterias identificados en esta zona intermedia coinciden con los tipos de bacterias encontrados en la zona de suelo. Sigue existiendo en esta zona intercambio y transporte de gases, aunque evidentemente al ser más profunda no existe la fuerte aireación de la zona de suelo.

C) Zona Profunda (Deep Zone): Solamente se da esta zona en aquellas áreas del terreno caracterizadas por climas áridos o semiáridos en donde se presentan zonas no saturadas con varios cientos de metros de profundidad. Su investigación es muy reciente Colwell (1989) en el desierto de Idaho y a 70 metros de profundidad se han encontrado cargas bacterianas de 10^6 colonias por gramo.

4º) El transporte y difusión de gases de la zona no saturada ha sido investigado por van Bavel (1951), Thorstenson *et al.* (1983) y Wood-Petraitis (1984). Los estudios realizados demuestran que la concentración de oxígeno disminuye con la profundidad mientras que al mismo tiempo aumenta la concentración de CO_2 , reflejando perfectamente, al relacionarlo con las cargas bacterianas, el oxígeno consumido por los microorganismos aerobios y consecuentemente el dióxido de carbono producido, análogamente a lo que sucede en un lecho bacteriano artificial.

5º) Los microorganismos de la zona no saturada viven y se desarrollan en los poros, por lo que la porosidad de la zona es una característica estructural fundamental para el crecimiento y el acceso de los nutrientes, lo que equivale al porcentaje de huecos existente en un lecho filtrante artificial.

Por todo esto se puede concluir que la eliminación del DBO_5 y parámetros similares DQO y MO, aún teniendo en cuenta la no uniformidad de la zona no saturada, debe ser semejante y adaptarse a algún modelo como el de Velz que describen dicho fenómeno en un lecho bacteriano.

Resultados obtenidos.

Ensayos con cápsulas

Con objeto de validar los datos experimentales, se han realizado experiencias de laboratorio para determinar si los tomamuestras de succión de porcelana porosa modifican los parámetros considerados en este trabajo.

Para la realización de la experiencia se han sumergido varias cápsulas de porcelana porosa en diferentes aguas residuales depuradas con distintas cargas de DBO determinando DBO_5 , DQO y MO.

Los valores medios obtenidos se expresan en la tabla 1.

	Valor medio en agua residual (mg/l)	Valor medio en cápsula (mg/l)	Tanto por ciento en el interior de la cápsula (%)
DBO ₅	40.50	39.50	97.53
DQO	51.00	48.20	94.50
MO	21.60	21.00	97.20

Tabla 1. Resultados obtenidos en los ensayos con cápsulas de porcelana porosa

Estos resultados indican que las cápsulas de porcelana porosa no retienen cantidades apreciables de los diferentes parámetros analizados, y por lo tanto la fiabilidad de los resultados obtenidos en los diferentes muestreos realizados en la parcela experimental se pueden considerar aceptables.

Valoración de los resultados obtenidos

De los resultados obtenidos en los diferentes muestreos, que abarcan un periodo comprendido entre 2/11/1992 hasta 19/12/1994, se ha observado para la DBO₅ lo siguiente:

1) Un descenso acusado del valor de la DBO aplicada (profundidad cero metros) hasta los 60 cm, puesto que la cápsula de succión colocada a 30 cm de profundidad no suministra en la mayoría de los casos cantidad de agua suficiente para realizar el análisis pertinente.

2) A partir de los 0,60 m de profundidad los valores obtenidos se ajustan a una ecuación del tipo:

$$A = A_0 e^{-Kx} \quad \text{ó} \quad A = A_0 10^{-kx}$$

como puede observarse en las figuras número 2(a, b), que se corresponden al muestreo de fecha: 19/10/93.

Siendo A: DBO₅ existente a la profundidad x

A₀: DBO₅ a la profundidad de cero metros.

K: Tasa de depuración en m⁻¹.

Hay que señalar que el valor A₀ obtenido en la ecuación no se corresponde con el valor aplicado sino que es el que correspondería, según la expresión matemática, al existente a profundidad cero metros, es decir en la interfase formada por aire, superficie del terreno y agua residual aplicada.

Por otra parte en las figuras anteriores pueden apreciarse dos zonas perfectamente diferenciadas:

-La primera de ellas corresponde a la zona no saturada comprendida en los 50 primeros centímetros aproximadamente (Soil Zone), caracterizada

por una fuerte aireación, elevada carga bacteriana y gran transferencia de gases, lo que origina indudablemente, una fuerte depuración del agua residual que atraviesa dicha zona y por tanto, la consiguiente disminución de la DBO_5 .

-La segunda zona que se aprecia es la descrita con el nombre genérico de "Intermediate Zone", en donde se sigue produciendo una depuración gradual dadas las características microbiológicas de dicha parte y en la que su comportamiento se ajusta o es semejante a la de un lecho o filtro percolador artificial, rigiéndose por el mismo modelo de ecuación matemática.

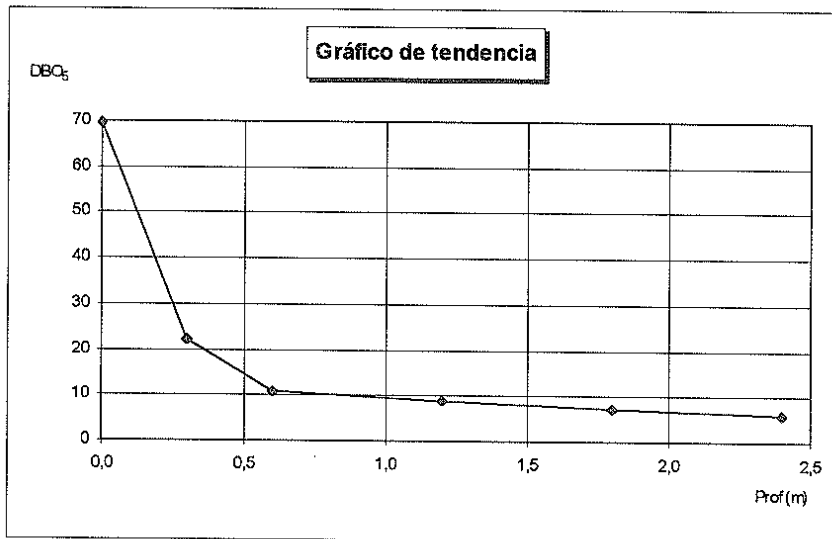


Figura 2a.-Gráfico de tendencia de la variación del DBO_5 con la profundidad.

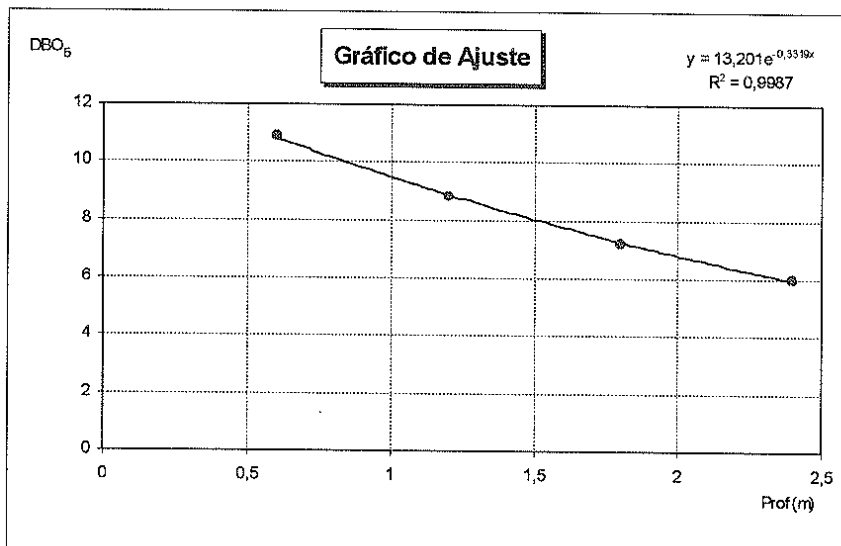


Figura 2b.-Gráfico de ajuste de la DBO_5 con la profundidad.

Por otra parte, la evolución de la DBO_5 a diferentes profundidades y en los diferentes muestreos realizados, se muestra en la figura 3.

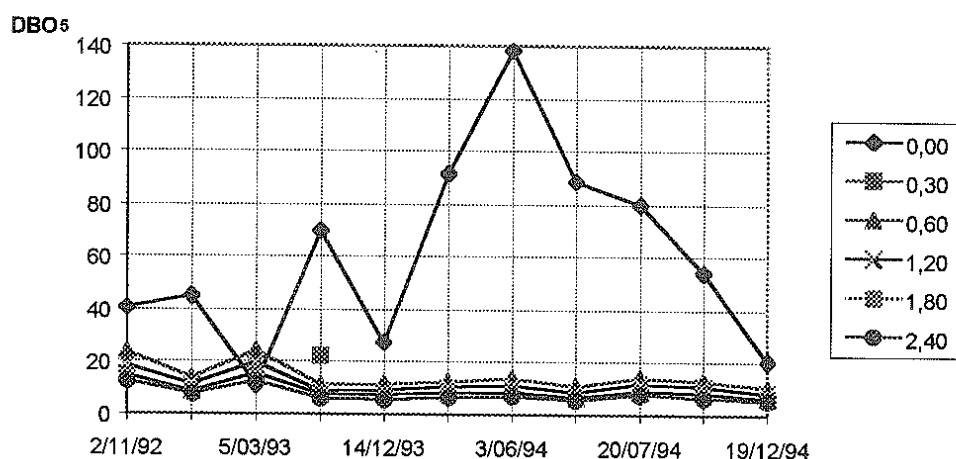


Figura 3.-Evolución de la DBO₅ a diferentes profundidades.

Hay que señalar que la profundidad de cero metros equivale al agua residual depurada empleada en el riego de la parcela experimental.

En cuanto a los valores de las diferentes profundidades, salvo en la que corresponde a 30 cm de profundidad de la que se carecen de medidas para poder realizar una comparativa, presentan una continuidad en los valores, a pesar de que en los primeros muestreos se aprecia una suave oscilación que debe interpretarse como el periodo de una correcta maduración desde el punto de vista bacteriano de la zona no saturada que consiste, en esencia, en el establecimiento de una película biológica equilibrada debida a la proliferación y crecimiento de los microorganismos que viven en la zona y que en definitiva son responsables de la depuración del agua residual, fenómeno semejante al que sucede en los lechos bacterianos artificiales, que en determinados casos, requieren algunas semanas de maduración y en otros caso requieren hasta meses, tal y como se describe en la bibliografía específica.

Otro hecho a destacar es que, a pesar de la aplicación de cargas de DBO diferentes en el agua residual de riego aplicada, los valores de la DBO a diferentes profundidades no son modificados substancialmente, lo que cabría interpretarse como funcionamiento en régimen estacionario de la zona no saturada como filtro percolador.

Respecto a la constante k que aparece en la ecuación anteriormente descrita (tasa de depuración), su evolución en el tiempo se muestra en la figura 4.

Se observa que a lo largo de los diferentes muestreos se produce una ligera oscilación del valor de k alrededor de un teórico valor medio, que podría interpretarse por la incidencia de una serie de factores que afectan a la constante k . Dichos factores pueden ser:

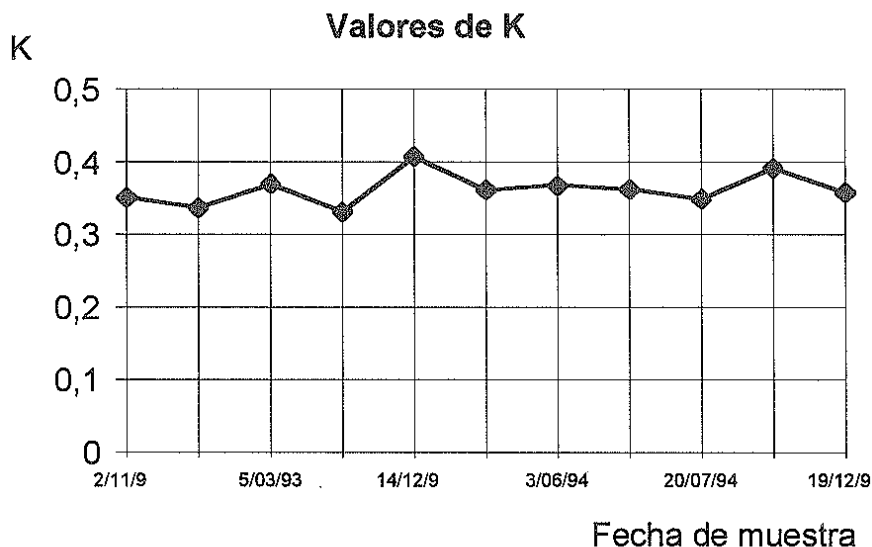


Figura 4. Valores de k (Tasa de depuración).

1. *Variación de la temperatura:* No hay que olvidar que la constante k es en definitiva, desde el punto de vista físico, una constante de velocidad que varía con la temperatura.

2. *Variación en el transporte de gases:* Que según Thorstenson et al; (1983) afectan a los procesos microbianos y al intercambio que debe existir entre la fase acuosa (agua intersticial) y la fase gaseosa.

3. *Variaciones en la velocidad de difusión del gas producido en los procesos bacterianos (CO₂):* Que según Van Bavel (1951) es un gas fundamental junto con el O₂ consumido en los procesos microbianos que ocurren en la zona no saturada y que pueden verse alterados, según la climatología que afecta a la zona no saturada.

En relación a los otros dos parámetros característicos de las aguas residuales como la DQO y la MO (oxidabilidad al permanganato) varían de manera semejante en profundidad a la DBO, tal como puede apreciarse en las figuras 5, 6 y 7 que se corresponden con la misma fecha de muestreo (19/10/1993):

Puesto que ambos parámetros DQO y MO son indicativos, por vía de oxidación química, de la cantidad de materia orgánica existente su disminución de forma semejante a la DBO corrobora la depuración efectiva del agua residual infiltrada a través de la zona no saturada.

Conclusiones

Aún sin examinar otros factores interesantes, tales como la variación de los compuestos nitrogenados (NH₄⁺, NO₃⁻, NO₂⁻) relacionados con los procesos bacterianos, desde el punto de vista exclusivo de la eliminación

de la DBO₅, la zona no saturada se comporta, aunque no de manera uniforme, como un filtro percolador que garantiza que el agua que llegue al acuífero tenga un bajo contenido de DBO, de lo que parece implicarse que el riego con agua residuales depuradas no debe producir un impacto negativo sobre las aguas subterráneas ya que la depuración que tiene lugar a lo largo de la zona no saturada es suficientemente intensa.

Por otra parte el modelo teórico aplicado permite en condiciones específicas, averiguar la tasa de depuración, conociendo el rendimiento R% que puede calcularse, realizando dos muestreos a diferentes profundidades x_1 (m) y x_2 (m); determinándose los valores respectivos de la DBO₅ A_1 , A_2 .

$$\%R = \frac{A_1 - A_2}{A_1} 100$$

La aplicación de la fórmula descrita en el modelo:

$$k = -\frac{1}{\Delta x} \log(100 - R) + \frac{2}{\Delta x}$$

siendo $Dx = x_2 - x_1$, da el valor de la tasa de depuración y por consiguiente se puede calcular el valor de la DBO₅ a una determinada profundidad.

Referencias

- ALEXANDER, M. (1977). "Soil Microbiology". *John Wiley and Sons. New York.*
- COLWELL, F.S. (1989). Microbiological comparison of surface soil and unsaturated subsurface soil from a semiarid high desert. *Applied and Environmental Microbiology* 55(9):2420-2423.
- CHAPELLE, F.H. (1993). *Ground-Water Microbiology and Geochemistry.. John Wiley and Sons Inc. New York.*
- BALKWILL, D. L. and GHIORSE, W.C. (1985). "Characterization of subsurface bacteria associated with two shallow aquifers in Oklahoma". *Applied and Environmental Microbiology* 50:580-588.
- ECKENFELDER, W. W. Jr. (1963). "Tricking Filtration Design and Performance". *Transactions ASCE*, vol. 128.
- ESTELLER, M.V. y MORELL I. (1993). "Irrigation with treated wastewater and its effect on the Castellon Plain Aquifer (Spain)". In: Nath, Candela, Hens y Robinson (Eds) "Environmental Pollution" *European Centre for Pollution Research. Vol I. pp:246-253.*
- ESTELLER, M.V., DURÁN, A., MORELL, I., GARCÍA-AGUSTÍN, P. y LAPEÑA, L. (1994). "Experimental citrus irrigation with reclaimed wastewater on a Spanish coastal aquifer". *Int. Conf. Ground. Drought, Poll and Mang. Brighon.*
- HERNÁNDEZ, A. (1992). *Depuración de aguas residuales. 2ª edición. Servicio de publicaciones de la escuela de ingenieros de caminos de Madrid (U.P.M.)*
- LAPEÑA, L., CEREZO, M., MORELL, I. y GARCÍA-AGUSTÍN P. (1993). "Utilización de aguas residuales urbanas depuradas al riego de cítricos en la Plana de Castellón".

Investigación en Zona No Saturada. De I. Morell. Universitat Jaume I. Castellón. pp:121-125.

THORSTENSON, D.C., WEEKS, E. P., HAAS, H. and FISHER, D.W. (1983). "Distribution of gaseous $^{12}\text{CO}_2$, $^{13}\text{CO}_2$ and $^{14}\text{CO}_2$ in the sub-soil unsaturated zone of the Western U.S. Great Plains". *Radiocarbon* 25(2):315-346.

VAN BAVEL, C.H.M. (1951). "A soil aeration theory based on diffusion". *Soil Science* 72:33-46.

VELZ, C. J. (1948). "A Basic Law for the Performance of Biological Beds". *Sewage Works Journal*, vol. 20, no. 4.

WAKSMAN, S.A.(1932). "Principles of soil Microbiology". *Baltimore: Williams & Wikins.*

WOOD, W. W. and M.J. PETRATIS. (1984). Origin and distribution of carbon dioxide in the unsaturated zone of the Southern High Plains of Texas. *Water Resources Research* 20(9):1193-1208.

DESARROLLO VEGETATIVO DE CÍTRICOS (*Citrus sinensis (L.) Osbeck*) REGADOS CON AGUA RESIDUAL URBANA DEPURADA

CEREZO, M., LAPEÑA, L. y GARCIA-AGUSTIN, P.

Grupo de Investigación de Biotecnología Vegetal.

Departamento de Ciencias Experimentales.

Universitat Jaume I. Apdo. 224. Castellón.

Introducción

En algunas áreas semiáridas de la costa oeste de España, la gran demanda de agua existente en la industria, en los centros urbanos y en la agricultura se satisfacen con agua subterránea. El uso abusivo de fertilizantes, pesticidas, así como la sobreexplotación de los acuíferos produce la pérdida progresiva de la calidad del agua subterránea. La necesidad de conservar la calidad del agua y el ahorro que supondría utilizar el agua residual depurada, hacen que sea una opción muy acertada para la agricultura.

La aplicación del agua residual depurada para riego ha sido estudiada con anterioridad en varios tipos de cultivo tales como, forraje (Bole and Bell 1978), alfalfa, trigo y maíz (Al-Jaloud *et al.* 1993; Montserrat 1993), algodón (Bielorai *et al.* 1984; Feigin *et al.* 1984), y otros cultivos vegetales (Basiouny 1984; Kirkham 1986; Neilsen *et al.* 1989 a; b; c; 1991; Ramos *et al.* 1989). Asimismo se han realizado en Florida, algunos estudios en los que se han utilizando árboles de cítricos, (Koo and Zekri 1989; Zekri and Koo 1990, 1994); sin embargo, se conocen muy pocos estudios en España sobre el posible efecto que el agua residual depurada causa en el cultivo de cítricos (Esteller *et al.*, 1993, 1994; Lapeña *et al.*, 1994).

Es sabido que el agua residual es una fuente importante de nutrientes para las plantas; sin embargo, la composición del agua residual varía entre las distintas localidades. Por ello el uso del agua residual depurada para riego se debería estudiar en cada caso concreto para optimizar la producción agrícola. El principal objetivo de este trabajo ha sido estudiar las posibilidades de uso del agua residual depurada y ver su efecto sobre el cultivo de los cítricos en la Plana de Castellón.

Material y métodos

Esta experiencia es continuación de los trabajos que se iniciaron en 1992. En este trabajo se muestran los resultados desde mayo de 1992 hasta noviembre de 1994. El campo experimental se encuentra situado en las proximidades de la estación depuradora de Castellón. Se cultivaron 2

parcelas con *Citrus sinensis* (L.) Osbeck. Una de ellas se regó con agua residual procedente de dicha depuradora, mientras que en la otra el riego se efectuó con agua procedente de un pozo cercano.

El espaciamento entre los riegos fue de 21 días entre Marzo y Octubre, mientras que durante el resto de los meses dependía de la distribución e intensidad de las lluvias. El volumen de riego fue de 0.7 m³/m²/año. Entre Marzo y Junio de 1993 se aplicaron a los cultivos distintos fertilizantes. La dosis aplicadas a los cultivos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Dosis de fertilizantes aplicadas a los cultivos.

	g.árbol ⁻¹ .año ⁻¹
Nitrosulfato amónico	100
Turba (7.5% OM)	143
Sulfato de Fe	62
Complejo N-P-K (15-15-15)	333
Complejo N-P-S-Mg (20-10-5-2)	250
% Total N	126 (g.ár. ⁻¹ .año ⁻¹)

En cada una de las parcelas se instalaron 4 cápsulas de succión de cerámica porosa, montadas en tubos de PVC de 7 cm de diámetro, a distintas profundidades (30, 60, 90 y 120 cm).

Al inicio del experimento se tomaron muestras de suelos a distintas profundidades (entre 15 y 120 cm) y se analizó la textura, el pH y materia orgánica. Los resultados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Composición del suelo, textura, pH y materia orgánica.

Prof. (cm)	Arcilla(%)	Limo (%)	Arena (%)	M.O. (%)	pH
15	24	26	50	1.61	7.62
30	22	33	45	1.33	
60	27	21	52	0.74	
90	30	16	54	0.70	7.45
120	18	33	49	0.60	

En el agua extraída de cada una de las cápsulas, se analizaron los iones nitrato, boro, cloruro y sodio como indicadores de la posible contaminación del acuífero.

El sodio del agua se analizó por espectrofotometría de absorción atómica, el boro se determinó espectrofotométricamente con azometina H y los nitratos por espectrofotometría del UV visible (Standard Methods, 1987).

Durante los primeros quince días de Octubre se recogieron al menos 10 hojas de cada uno de los árboles. El peso seco se obtuvo después de colocar el material vegetal en una estufa de aire forzado durante 48h a 60-65 °C. Las concentraciones de sodio, calcio, magnesio, potasio y fósforo en hojas se analizaron por espectrofotometría de absorción atómica (Chapman y Prat 1961). El boro de las hojas se analizó por espectrofotometría del UV-visible. El nitrógeno total se determinó por el método microkjeldahl (Bremner 1965). Por último, para la determinación del cloruro en hojas se siguió básicamente el método de Gillian (1971), valorándose la concentración de este ion mediante un analizador Corning-926.

Resultados y discusión

Se observaron claras diferencias en la composición de los dos tipos de agua para riego. En los árboles regados con agua residual depurada se observó que recibían un mayor aporte de diferentes elementos (P, Na⁺, Cl⁻, K⁺ y B) y de materia orgánica. Sin embargo el aporte de N mineral (N-NO₃⁻, N-NO₂⁻, N-NH₄⁺) proporcionado por los dos tipos de agua era similar (tabla 3).

Tabla 3. Elementos minerales y materia orgánica (MO), aportados por el agua de riego, expresados como g/árbol/año.

	Agua residual depurada	Agua subterránea
N (mineral)	9.96±1.6	9.87±1.4
P	5.04±0.6	0.08±0.05
K ⁺	20.5±2.25	2.05±0.15
Na ⁺	241.8±25	51.6±3.5
Cl ⁻	324.3±2.8	74.8±5.0
B	2.6±0.3	0.8±0.3
MO	59.1±6.4	10.4±1.4

Las muestras de agua tomadas de las cápsulas después de cada riego, durante los años 92 y 93 mostraron un incremento de ion nitrato en la capa superficial de la parcela regada con agua residual, el cual se podría explicar por el aporte de materia orgánica que lleva incorporada la misma. La concentración de los iones Cl⁻, Na⁺ y B disminuyeron progresivamente con la profundidad, debido probablemente al fuerte lavado que se produce como consecuencia del riego intensivo que se aplica al cultivo.

El análisis de los contenidos foliares de N mostró niveles ligeramente inferiores en los árboles regados con agua subterránea que en aquellos

regados con agua residual durante los tres años que ha durado la experiencia. Esta diferencia puede ser debida a los elevados niveles de materia orgánica encontrados en el agua residual que pueden suponer un aporte extra de N. (tabla 4). Por otra parte, estos resultados indican que la utilización de agua residual depurada puede compensar en parte el aporte de fertilización nitrogenada necesaria para este tipo de cultivos, como ha sido demostrado con anterioridad por otros autores (Zekri y Koo, 1994). En este sentido, Neilsen *et al.*, (1991) en árboles de cerezo, Feigin *et al.*, (1984) en algodón y Basiouny (1984) en melocotonero encontraron un incremento en el N foliar cuando a las plantas se les aplicaba agua residual. Sin embargo en árboles de manzano que habían sido regados con agua residual los niveles foliares de N se incrementaban sólo ligeramente (Neilsen *et al.*, 1989c).

Tabla 4. Efecto del tipo de agua de riego y % de fertilización de N, sobre la concentración foliar de N en *Citrus sinensis*

	N foliar (% peso seco)		
	1992	1993	1994
Agua de riego			
Subterránea	1.65	1.94	2.62
Residual depurada	2.05	2.6	2.78

Los niveles foliares de Cl^- y Na^+ en plantas regadas con agua depurada, permanecieron durante el periodo de la experiencia por debajo de los niveles considerados tóxicos para los cítricos. Embleton *et al.*, (1973) establecieron en 0.7% y 0.25% para el Cl^- y Na^+ respectivamente el límite máximo por encima de los cuales las plantas presentan problemas de toxicidad.

Tabla 5. Efecto del tipo de agua de riego sobre la concentración foliar de Cl^- y Na^+ (% peso seco) en *Citrus sinensis*.

	1992		1993		1994	
	Cl^-	Na^+	Cl^-	Na^+	Cl^-	Na^+
Agua de riego						
Subterránea	0.07	0.10	0.07	0.05	0.11	0.03
Residual depurada	0.08	0.06	0.08	0.04	0.22	0.11

Las concentraciones de K^+ en árboles regados con agua de pozo fueron significativamente mayores que en los regados con agua residual (tabla 6). Probablemente, los elevados niveles de Na^+ que contiene el agua depurada (tabla 3) han podido antagonizar la absorción de K^+ tal y como ha sido demostrado previamente en cultivos de cítricos (Bañuls *et al.*, 1990).

No se encontraron diferencias en los contenidos foliares de P en los dos tipos de agua (tabla 6), sin embargo se observa una gran cantidad de P en el agua residual (tabla 3); esto se podría explicar debido a que la

cantidad de P proporcionada por ambos tipo de agua es mínima con respecto a la que contiene el suelo o es aportada por los fertilizantes.

Tabla 6. Efecto del tipo de agua de riego sobre la concentración foliar de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , P (% peso seco) en *Citrus sinensis*

Agua de riego	1992				1993				1994			
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	P	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	P	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	P
Subterránea	4.10	0.18	2.06	0.21	3.46	0.34	1.30	0.17	3.97	0.34	1.58	0.15
Residual depurada	4.96	0.18	1.37	0.17	3.57	0.37	1.19	0.19	4.67	0.42	1.39	0.16

Los valores foliares encontrados durante los tres años de la experiencia para el calcio y el magnesio son óptimos para la nutrición de las plantas.

En cítricos, concentraciones de B en el agua de riego superiores a 2 mg/l, pueden causar importantes trastornos en el desarrollo vegetativo (Pomares, 1986). Las concentraciones foliares de B no superaron durante los tres años de la experiencia los 260 ppm considerado el límite máximo permitido para este tipo de cultivos; probablemente el pH del agua y del suelo dificultaron la absorción de este elemento por las raíces (pH alcalino) (tabla 7).

Tabla 7. Efecto del tipo del agua sobre la concentración foliar de B en *Citrus sinensis*.

Agua de riego	1992	1993	1994
Subterránea	152.4	177.9	94.7
Residual depurada	178.6	192.9	161.2

Referencias

- AL-JALOOD, A., G. HUSSAIN, A. J. AL-SAATI, and S. KARIMULLAH. (1993). Effect of wastewater on plant growth and soil properties. *Arid. Soil Res. Rehab.* 7:173-179.
- APHA, AWWA and WPCF. (1980). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 15th ed.
- BASIONY, F. M. (1982). Wastewater irrigation of fruit trees. *Biocycle* 23:51-53.
- BASIONY, F. M. (1984). The use of municipal treated effluent for peach tree irrigation. *Proc. Florida State Hort. Soc.* 97: 345-347.
- BERRY, W. L., A. WALLACE, and O. R. LUNT. (1980). Utilization of municipal wastewater for culture of horticultural crops. *Hortscience* 15:169-171.
- BIEROLAI, H., I. VAISMAN, and A. FEIGINI. (1984). Drip irrigation of cotton with treated municipal effluents: I. Yield response. *J. Environ. Qual.* 13:231-234.
- BOLE, J. B. and R. G. BELL. (1978). Land application of municipal wastewater: yield and chemical composition of forage crops. *J. Environ. Qual.* 7:222-226.

- BOUWER, H. and K. L. CHANEY. (1974). Land treatment of wastewater. *Adv. Agron.* 26:133-176.
- BREMNER, J. M. (1965). Total nitrogen. p. 1149-1178. *In: C. A. Black (ed). Method of soil analysis. Part 2. Academic Press. N. Y.*
- BRISTER, G. H. and R. C. SCHULTZ. (1981). The response of a southern Appalachian forest to wastewater irrigation. *J. Environ. Qual.* 10:148-153.
- BURTON, T. M. and J. E. HOOK. (1979). A mass balance study of application of municipal wastewater to forest in Michigan. *J. Environ. Qual.* 8:589-596.
- CAMPBELL, W. F., R. W. MILLER, J. H. REYNOLDS, and T. M. SCHREEG. (1983). Alfalfa, sweet corn and wheat responses to long-term application of municipal wastewater to cropland. *J. Environ. Qual.* 12:243-249.
- CHAPMAN, H.D. and P. R. PRATT. (1961). Methods of analysis for solid. *Plants and waters. University of California.*
- CROMER, R. N., D. TOMPKINS, N. J. BARR, and P. HOPMANS. (1984). Irrigation of Monterey pine with wastewater: effect on soil chemistry and groundwater composition. *J. Environ. Qual.* 13: 539-542.
- EMBLETON, T.W., W. W. JONES, K. LABANAUSKAS, and W. REUTHER. (1973). Leaf analysis as a diagnostic tool and guide to fertilization. p. 183-212. *In: W. Reuther (ed). The citrus industry. University of California. Berkley.* 3:183-212.
- ESTELLER, M.V. y MORELL, I. (1993). Irrigation with treated waste water and its effect on the Castellón plain aquifer. *Int. Conf. Envir. Poll. Sitges.* 246-253.
- ESTELLER, M.V., DURAN, A., MORELL, I., GARCÍA-AGUSTIN, P. y LAPEÑA, L. (1994). Experimental citrus irrigation with reclaimed wastewater on a spanish coastal aquifer. *Int. Conf. Ground. Drought. Poll. and Mang.* 55-63.
- FEIGINI, A., I. VAISMAN, and H. BIELORAI. (1984). Drip irrigation of cotton with treated municipal effluents: II. Nutrient availability in soil. *J. Environ. Qual.* 13:234-238.
- GILLIAN, J. W. (1971). Rapid measurement of chloride in plants materials. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35:512-513.
- KIRKHAM, M.B. (1986). Problems of using wastewater on vegetable crops. *Hortscience.* 21:24-27.
- KOO, R. C. J. (1976). Horticultural considerations of irrigation with citrus processing wastewater. *Transactions. Citrus Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineering.* 22:1-15.
- KOO, R. C. J. and M. ZEKRI. (1989). Citrus irrigation with reclaimed municipal wastewater. *Proc. Florida State Hort. Soc.* 102:52-56.
- KOO, R. C. J. and J. W. SITES. (1955). Results of research and response of citrus to supplemental irrigation. *Proc. Florida Soil Sci. Soc.* 15:180-190.
- LAPEÑA, L., CEREZO, M., MORELL, I. y GARCÍA-AGUSTIN, P. (1994). Aplicación de aguas residuales urbanas al riego de citricos en la Plana de Castellón. Investigación de la zona no saturada. Ed. I. Morell. *Collecció. Summa. Ciencias experimentals.* pp: 99-104.
- MONSERRAT, X. (1993). Aplicación de aguas residuales en Sant Jordi (Mallorca). p. 242-258. *In: L.Candela. and M.Varela (eds). La zona no saturada y la contaminación de las aguas subterráneas. Teoría, Medición y Modelos. Univ. Poli. Catalunya. Barcelona.*

- NEILSEN, G. H., D. S. STEVENSON, J. J. FITZPATRICK, and C. H. BROWNLEE. (1989b). Yield and plant nutrient content of vegetables trickle-irrigated with municipal wastewater. *Hortscience* 24:249-252.
- NEILSEN, G. H., D. S. STEVENSON, J. J. FITZPATRICK, and C. H. BROWNLEE. (1989c). Nutrition and yield of young apple trees irrigated with municipal wastewater. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 114:377-383.
- NEILSEN, G. H., D. S. STEVENSON, J. J. FITZPATRICK, and C. H. BROWNLEE. (1991). Soil and sweet cherry response to irrigation with wastewater. *Can. J. Sci. Soil Soc.* 71:31 A1.
- NEILSEN, G. H., D. S. STEVENSON, and J. J. FITZPATRICK. (1989a). The effect of municipal wastewater irrigation and rate of N fertilization on petiole composition, yield and quality of okanagan riesling grapes. *Can. J. Plant Sci.* 69:1285-1294.
- PARSON, D. C. and G. W. EATON. (1980). Nutrient content of the petioles of some grape cultivars in British Columbia. *Can. J. Plant Sci.* 60: 873-877.
- POMARES, F. (1986). La salinidad del suelo en los cítricos. *Reports of I.V.I.A..Conselleria de Agricultura y Pesca. Generalitat Valenciana. Spain.*
- RAMOS, C., D. GOMEZ DE BARREDA, J. OLIVER, E. LORENZO and J.R. CASTEL. (1989). Aguas residuales para riego: Un ejemplo de aplicación en uva de mesa. p. 167-184. *In: E. Cabrera and A. Sahuquillo (eds) El agua en la Comunidad Valenciana. Generalitat Valenciana.*
- SOPPER, W. E. and L. T. KARDOS. (1973). Vegetation responses to irrigation with treated municipal wastewater. p. 271-294. *In: W. E. Sopper and L. T. Kardos (eds). Recycling treated municipal wastewater and sludge through forest and cropland. Penn. State University Park, Pa.*
- STEWART, H. T. L. and D. W. FLINN. (1984). Establishment and early growth of trees irrigated with wastewater at four sites in Victoria, Australia. *For. Ecol. Mgt.* 8:243-256.
- U. S. Environmental Protection Agency. (1981). Process design manual for land treatment of municipal wastewater. *E.P.A. 615/1-81-013. Cincinnati, OH.*
- U.S. Salinity Laboratory Staff. (1954). Saline and alkali soils. *Agr. Hdbk. 60. USDA. Washington, DC.*
- ZEKRI, M. and R. C. J. KOO. (1990). Effects of reclaimed wastewater on leaf and soil mineral composition and fruit quality of citrus. *Proc. Florida State Hort. Soc.* 103:38-41.
- ZEKRI, M. and R. C. J. KOO. (1994). Treated municipal wastewater for citrus irrigation. *J. Plant Nutri.* 17:693-708.

