

Sistemas de tratamiento de aguas residuales por aplicación al suelo

**Dioselina Alvarez Bernal,
Silvia M. Contreras Ramos
y Héctor M. Poggi Varaldo**

La aplicación de agua residual al suelo implica el uso de las plantas, de la superficie y de la matriz del suelo para su tratamiento. El reuso de efluentes tratados se ha incrementado en la agricultura ya que tiene como metas promover la agricultura sostenible, preservar las escasas fuentes de agua y mantener la calidad ambiental¹. Para el caso de México, este tipo de alternativa parece ser atractiva debido a la unión de dos factores: las regiones áridas donde la producción agrícola depende del riego y el bajo costo asociado al tratamiento de aguas residuales.

Ventajas y limitaciones

La práctica del tratamiento de aguas residuales por aplicación (vertido) al suelo (TARVES) ha recobrado interés a la luz de sus innumerables ventajas. Una de sus principales ventajas es de tipo económico, siempre y cuando se lleven a cabo adecuadamente los criterios apropiados de diseño, y sobre todo el tipo de efluente a tratar, ya que el reuso del agua renovada puede ser de gran utilidad en lugares donde existe escasez de agua. Las opciones de reuso han sido tema de diversas investigaciones: irrigación de cultivos y bosques, en usos industriales, en usos domésticos y en usos municipales (tabla 1)¹. En agricultura también es posible reducir los costos utilizando monitoreo de aguas residuales y políticas de irrigación-fertilización adecuadas². Sin embargo, las desventajas aparecen cuando estos sistemas no son

Los autores son investigadores del Departamento de Biotecnología y Bioingeniería del Cinvestav. Dirección electrónica: sm_contreras@yahoo.com.mx

Tabla 1: Calidad de agua tratada y su uso/reuso.

Tipo de uso	Tratamiento	Calidad del Agua
Urbana, irrigación de cultivos que se ingieren crudos, áreas verdes	Secundario, filtración y desinfección	pH = 6-9; ≤10mg/L DBO; ≤ 2 NTU Coliformes fecales /100 ml ND ≥1 mg/L Cl ₂ residual
Irrigación de áreas de acceso restringido, construcción, reuso ambiental	Secundario y desinfección	pH 6-9; ≤ 30mg/L DBO; ≤30 mg/L SST; ≤ 200 col. Fec. /100ml ≥1 mg/L Cl ₂ residual
Recarga de acuífero no potable por rocío	Depende del sitio y del uso, trat. primario mínimo	Depende del sitio y del uso
Recarga de acuífero no potable por inyección	Depende del sitio y del uso, trat. secundario mínimo	Depende del sitio y del uso
Recarga de acuífero potable por rocío	Depende del sitio y del uso, trat. secundario y desinfección mínimo	Depende del sitio y de los estándares para agua potable después del percolación por la zona vadosa
Recarga de acuífero potable por inyección, ampliación de superficies	Secundario, filtración, desinfección, tratamiento avanzado	pH = 6.5- 8.5; ≤2 NTU; ND Coli. Fec./100ml; ≥ 1 mg/L Cl ₂ Residual Conociendo los estándares para agua potable

Fuente : US. EPA (1992).

aplicados en forma apropiada y se generan riesgos para la salud pública: se ha observado que se contaminan los cultivos, o se eutrofican ríos, lagos y estanques. Otro de los aspectos de alto riesgo está asociado al vertido de aguas residuales de industrias tales como la química, de curtidería, de minería, sobre todo en países subdesarrollados.

En nuestro país existen problemas reales como el del estado de Guanajuato (principalmente la región de León), donde las tierras de cultivo son irrigadas con aguas residuales de las industrias curtidoras y de la industria química, y se están realizando estudios del nivel de contaminación con cromo en suelos y cultivos. El problema radica en la falta de una planeación del tratamiento de las aguas residuales y en el caso omiso a la normatividad que rige el vertido de aguas residuales³. En la tabla 2 se citan algunos casos donde se han utilizado procesos de aplicación al terreno.

Los tres procesos principales de aplicación al terreno son la irrigación, la infiltración rápida y la escorrentía superficial (figura 1). La irrigación es un proceso de aplicación al suelo de un efluente para su tratamiento y para proporcionar ciertos compuestos para el crecimiento de las plantas. El efluente aplicado sufre un tratamiento por medios físicos, químicos y biológicos al filtrarse en el suelo. El efluente es regado por aspersión, inundación o surcos (figura 2). La infiltración rápida es un tratamiento que se produce cuando el agua atraviesa rápidamente (muchas veces por inyección) la matriz del suelo. Los objetivos del sistema pueden incluir la recarga de acuíferos, el tratamiento natural seguido de la extracción por bombeo o por drenaje para su recuperación y el tratamiento natural con agua renovada que se desplaza vertical y lateralmente en el suelo recargando una corriente de agua superficial. La escorrentía superficial es esencialmente un proceso de tratamiento biológico en el cual

Tabla 2: Sumario de casos de TARVES.

Tratamiento	Tipo de efluente	Pre-tratamiento	Tiempo de tratamiento	Impacto	Referencia
Irrigación arrozal	Industria papel/ doméstica	Si	(+) de 60 años	Remoción 60-88% SS y 30-50% DBO, No afectó manto fréatico, suelo ↑ [], K, Ca, N, CIC ↓ [Mg]	Adishesha ⁴
Irrigación	Industria láctea	Si	2 años	Promovió la desnitrificación	Singleton
Circulación superficial en lámina	Industria de alimentos 22-226	NR	10 años	Remoción ↑ DQO, CORT, DBO ₅ y SST >92%, N 84 -89%	Tedaldi
Irrigación	Industria de carnes	NR	NR	NR	Bidwell ⁵
Irrigación (<i>Suaeda esteroa</i>)	Acuícola ↑ [sal]	Filtro de recirculación	3.5 meses	↑ [P], ↓ [N] y ↑ biomasa	Brown
Irrigación a arrozales, 2 variedades	Municipal	Sedimentación primaria	1.5 años	Remoción FT (83 %), DQO (73%) y DBO (85.8%), NT (76%)	Jiantog ⁶
Irrigación a <i>Eucalipto</i>	Industria de carne	Laguna de estabilización	4 meses	Remoción: N 60% y P 30%	Guo ⁷
Irrigación a arrozales	Industria láctea/ establos	Laguna de estabilización	NR	NR	Brewer ⁸
Ultrafiltración	Industria de pescadería	NR	NR	↓ DBO ₅ remoción del 80 % efluente	Mameri
Irrigación por surcos en arrozales	Municipal	Laguna de sedimentación y estabilización	4 meses	97.7% DBO ₅ 50 % SS 94 % N 96 % FT	Gao ⁹

se aplica el agua residual sobre las zonas de un terreno dispuesto en pendiente desde donde fluye a través de la superficie vegetal hasta unas zanjas de recolección. La renovación del agua se lleva a cabo por medios físicos, químicos y biológicos al fluir el agua residual en una delgada lámina sobre la pendiente relativamente impermeable.

Las consideraciones fundamentales en el diseño y operación de los sistemas de aplicación al suelo son el conocimiento de las características del agua residual, de los mecanismos de tratamiento, vegetación y los requisitos concernientes a la salud pública, todos ellos fundamentales para el planeamiento y funcionamiento satisfactorios (tabla 3).

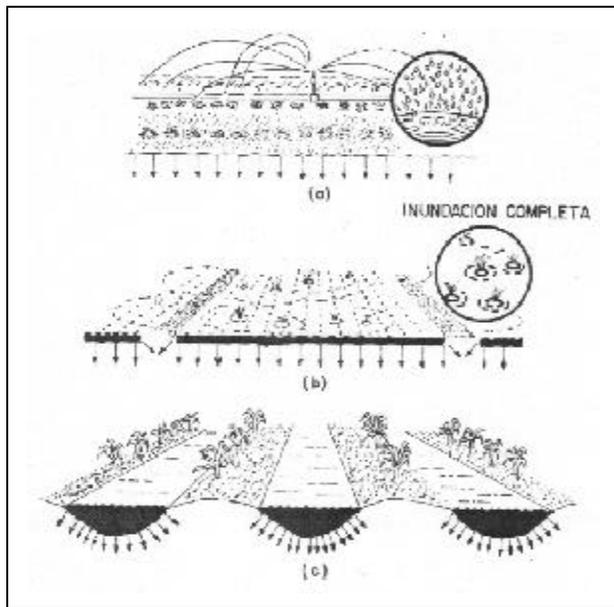


Figura 1. Técnicas de irrigación: (a) aspersión, (b) inundación, (c) por surcos.

Agua residual y vegetación

Los sistemas de aplicación al terreno para eliminar materia orgánica son efectivos ya que es filtrada por la hierba, el mantillo, la capa superficial del suelo y es reducida por oxidación biológica; el nitrógeno puede eliminarse por incorporación en el cultivo y por desnitrificación; los procesos principales de eliminación del fósforo son la precipitación y adsorción química, aunque las plantas también captan ciertas cantidades; los cationes intercambiables, como los iones de Na, Ca y Mg en altas concentraciones (sobre todo Na), en suelos arcillosos se dispersan con las partículas del suelo y disminuyen su permeabilidad. Muchos de los elementos a nivel de residuos son esenciales para el crecimiento de las plantas, pero algunos son tóxicos en concentraciones mayores, tanto para plantas como para los microorganismos; los mecanismos de eliminación de las bacterias comunes incluyen la retención, muerte, sedimentación, atrapamiento y la adsorción (tabla 4). Las plantas se utilizan en este tipo de sistemas para captar el nitrógeno y el fósforo del agua residual aplicada, mantener e incrementar las tasas de entrada de agua y la permeabilidad del suelo, reducir la erosión y servir como medio para la reproducción de microorganismos¹⁰.

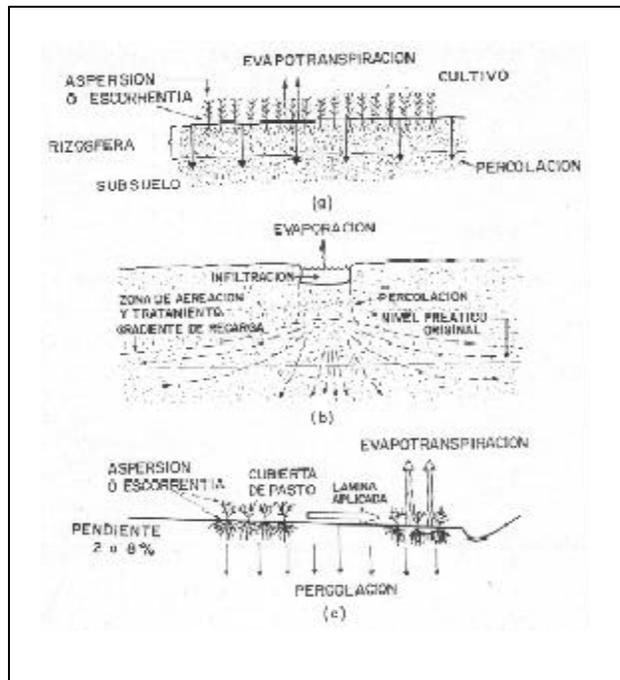


Figura 2. Tipos de procesos de tratamiento por aplicación al suelo: (a) irrigación, (b) infiltración rápida, (c) escorrentía superficial.

Salud pública

Los aspectos de salud pública que están relacionados con el uso del agua residual involucran la supervivencia de bacterias patógenas y virus en las pequeñas gotas de aerosol pulverizadas sobre y en el interior del suelo. La Organización Mundial de la Salud establece que para el riego sobre cualquier tipo de cultivo el agua no debe tener más de 100 coliformes fecales/100 ml¹¹. En California y Arizona las aguas residuales depuradas para el riego de cultivos que se consumen crudos no pueden tener una media geométrica superior a 2.2 coliformes fecales/100 ml, y ninguna muestra puede tener más de 23-25 coliformes fecales/100 ml¹². En Israel, las aguas para regar cultivos que después se van a consumir crudos deben tener menos de 12 coliformes fecales/100 ml a lo más en 80% de las muestras, y menos de 2.2 coliformes fecales/100 ml a lo más en 50% de las muestras; además deben tomarse precauciones por la posible conexión entre patógenos y la contracción de enfermedades por animales o seres humanos. Existe la necesidad de contar con zonas de amortiguamiento o desinfección para minimizar riesgos a la salud pública y deben evaluarse, según el caso, los siguientes factores: acceso público al lugar, el

Tabla 3: Comparación de los distintos tratamientos por aplicación al suelo.

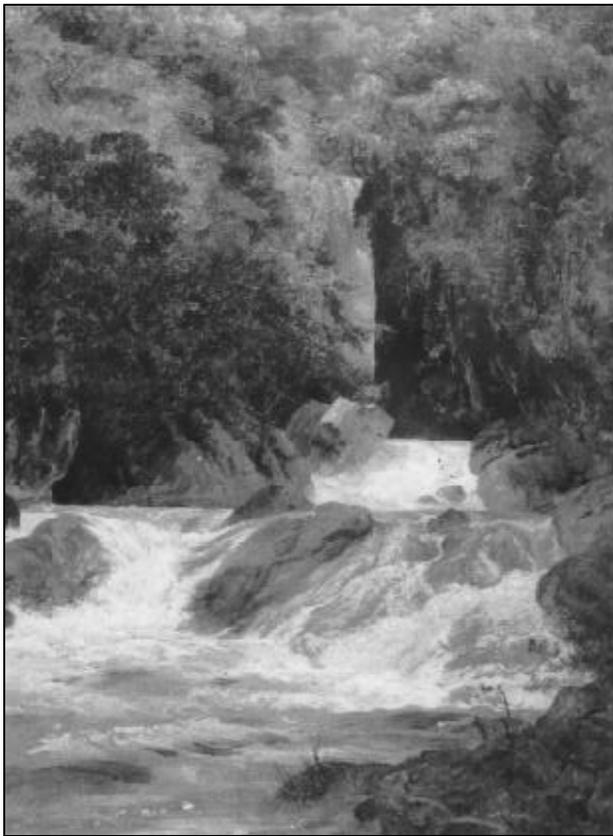
Característica	Irrigación	Infiltración rápida	Escorrentía superficial
Técnicas de aplicación	Aspersión o superficial	Aspersión o superficial	Aspersión o superficial
Tasa anual de aplicación, m.	0.6-6.0	6-120	3-20
Superficie de terreno, ha	22-226	1-22	10-44
Tasa de aplicación semanal, m.	2.5-10	10-210	6-15
Tratamiento mínimo previo	Sedimentación primaria	Sedimentación primaria	Desbaste y desarenado
Eliminación del agua residual aplicada	Evapotranspiración y percolación	Percolación principalmente	Drenaje zanjas y evapotranspiración con algo de percolación
Vegetación	Necesaria	Opcional	Necesaria
Restricciones climáticas	Almacenamiento en tiempo frío y para la precipitación	Ninguna (modificada tiempo frío)	Almacenamiento en frío
Distancia hasta la capa freática en metros	0.6-0.9 (mínimo)	3.0 (aceptables profundidades menores cuando exista drenaje)	No es crítica
Pendiente	Menos del 20% en terreno cultivado: menos del 40% en no cultivado	No crítica: las pendientes excesivas requieren mucho movimiento de tierras	Pendientes muy baja 2-8%
Permeabilidad del suelo	Moderadamente baja a moderadamente alta	Alta (arenas margosas)	Baja (arcillas, limos, y suelos con barreras impermeables)

tamaño de la zona regada, la posibilidad de disponer de zonas de amortiguamiento o de plantar árboles o arbustos y las condiciones climáticas¹².

Un estudio llevado a cabo en 1994 en Israel demostró que los cultivos irrigados con efluentes de aguas residuales municipales contenían una carga de microorganismos alta; los vegetales resultaron ser los más vulnerables, lo cual representa un riesgo para la salud pública, ya que ese tipo de alimentos se consumen crudos¹². Por otro lado, en la región del valle del Mezquital, en el estado de Hidalgo, por varios años se ha irrigado con aguas residuales crudas provenientes de la ciudad de México; este exceso de irrigación ha recargado los mantos acuíferos que se utilizan como agua potable. Análisis específicos indican un mal tratamiento de purificación y representan un riesgo potencial para enfermedades, principalmente de tipo gastrointestinal¹³. En la tabla 4 se muestran algunos casos de estudio para diferentes efluentes y su porcentaje de remoción.

Aplicación al suelo por irrigación

Este sistema puede aplicarse a los cultivos o a la vegetación tanto por aspersión como por técnicas superficiales (figura 2) para anular la descarga superficial de nutrientes, obtener un beneficio económico del uso de agua y nutrientes para producir cultivos comercializables; también es útil para conservar el agua por sustitución cuando se riegan céspedes y parques, así como la preservación y desarrollo de zonas verdes y espacios abiertos. Cuando el agua de irrigación es un recurso escaso, los cultivos pueden regarse con tasas de aplicación de 2.5 –7.5 cm/semana, dependiendo del cultivo. Los cultivos desarrollados con altas tasas de irrigación (entre 6-10 cm/semana) son generalmente pastos con alta tolerancia al agua. El agua residual es captada por las plantas, evaporada parcialmente (evapotranspiración) y filtrada a través del suelo.



Un estudio realizado por Brown⁵ registró el uso de un efluente salino de cultivos de tilapia, irrigado en cultivos de forraje de *Suaeda esteroa* que tiene un potencial halófito; a diferentes velocidades de evotranspiración de 50-250% se logró obtener una remoción de nitrógeno y fósforo y una alta producción en biomasa del forraje.

Para seleccionar el terreno, los principales factores que se deben considerar son la drenabilidad del suelo, que es el factor fundamental, y el tipo de cultivo o vegetación elegida que afecta directamente a la carga hidráulica. Para este sistema es preferible un suelo moderadamente permeable capaz de infiltrar aproximadamente 5 cm/d o más de modo intermitente, y son adecuados los suelos arcillosos y areno-limosos. La superficie total depende de las tasas de aplicación.

El tratamiento previo a la aplicación depende de numerosos factores: las normas concernientes a la salud pública, la carga aplicada con respecto a las características críticas del agua residual y la efectividad y fiabilidad de los equipos empleados, el tipo de cultivo a desarrollar, el

uso que se destina al producto, el grado de contacto entre la población y el efluente y el método de aplicación. En un caso particular⁸ la irrigación por rocío de efluentes de lácteos y de establos, con una gran variación en la tasa de aplicación anual (29 a 817 m³/ha) se obtuvo una carga de nitrógeno en exceso a la permitida, por lo que se sugirió un tratamiento previo al efluente como una separación mecánica de sólidos suspendidos, seguida de una sedimentación y una digestión anaerobia. Para el riego de cultivos de una sola cosecha anual, la aplicación del agua residual se restringe a la época de riego, y el almacenamiento puede ser un periodo variable, entre 1 y 3 meses en climas moderados y entre 4 y 7 meses para climas fríos. En cuanto a la temperatura, se ha comprobado que este sistema funciona bien aun por debajo de los 0°C.

Para determinar las características del agua residual que actúan como factores limitantes, deben efectuarse balances para el agua, nitrógeno, fósforo, materia orgánica y otros constituyentes de concentración anormalmente alta. Los elementos a considerar en la determinación de la carga hidráulica son el caudal de efluente a aplicar, la precipitación, la evapotranspiración, la percolación y la escorrentía. Deben considerarse también las variaciones estacionales de cada mes, así como de cada año.

La realización de un balance de nitrógeno total también es muy importante, ya que los iones de nitrato tienen movilidad en el suelo y pueden afectar a la calidad del agua receptora. La eliminación de nitrógeno por captación del cultivo es función del cultivo producido y requiere la cosecha y la eliminación física de aquél para ser efectiva. El fósforo es eliminado del agua residual que se percola por fijación y precipitación química; esta carga debe estar por debajo de la capacidad del suelo para fijar y precipitar el fósforo. Sin embargo, se ha visto que también puede ser utilizado por las plantas; Guo⁷ encontró que para efluentes de industrias cárnicas irrigados en cultivos de *Eucalyptus* se alcanzaba una remoción del 60% para nitrógeno y un 30% para fósforo con tasas de aplicación bajas de 1-4 cm/semana. Otro estudio realizado por Jiantong⁶, con irrigación de efluentes de agua municipal doméstica en cultivos de arroz, tuvo una remoción de fósforo del 83%, de nitrógeno del 76%, del cual el 50% fue asimilado por las plantas, y una remoción de DBO del 85%.

La carga orgánica media diaria debe calcularse a partir de la carga hidráulica y de la concentración de DBO₅ del



efluente aplicado; se ha estimado entre 11.2 y 28 kg/ha.d para mantener un contenido permanente de materia orgánica en el suelo. Un caso estudiado para irrigación de efluentes de la industria del papel, en combinación con aguas municipales para cultivos de arroz, demostró que el tratamiento lograba remover un 60-88% sólidos suspendidos y un 30-50% DBO del efluente; al mismo tiempo se obtuvo un aumento en la producción del cultivo de 6.14-6.74 toneladas con irrigación del efluente en comparación con una producción de 4.22 ton de cultivo con agua potable⁴.

Este sistema es muy eficiente para tratamiento de aguas residuales pero sólo como un proceso secundario; Gao⁹ registró un caso de tratamiento de agua municipal por irrigación por surcos en cultivos de arroz y sorgo en Shengyang, China, pero con un previo tratamiento primario al pasar el efluente por una laguna de sedimentación y una laguna de estabilización; se logró una alta remoción de DBO₅ (97.7%) y de sólidos suspendidos (50%), al mismo tiempo que una remoción de nitrógeno del 94% y de fósforo total del 96%.

La superficie de campo es aquella parte de la zona en que tiene lugar el proceso de tratamiento y se calcula en base a las cargas aceptables para cada parámetro de carga diferente (hidráulico, nitrógeno, fósforo, materia orgánica u otros), seleccionando así la superficie mayor. Las características más importantes de los cultivos para sistemas de irrigación son la capacidad de eliminación de nitrógeno, las necesidades de agua y tolerancias, la sensibilidad a los constituyentes del agua residual, las normas sanitarias vigentes y los aspectos relativos a la operación del sistema. Las tres clases de cultivo más utilizados son pastos y cultivos como la cebada, sorgo, maíz y mijo; en zonas ajardinadas se requiere menos agua que otros tipos de vegetación; los bosques ofrecen varias ventajas como lugares para la aplicación de agua residual.

Las técnicas de distribución pueden clasificarse en dos grandes grupos; sistemas de aspersión (figura 2 a) y sistemas de aplicación superficial (figuras 2 b y c). Los sistemas de aspersión son de dos tipos, fijos y móviles; los sistemas fijos pueden estar colocados sobre la superficie del terreno o enterrados. Ambos tipos consisten en aspersores de impacto montados sobre unos tubos que se encuentran espaciados a lo largo de las tuberías de distribución, las cuales están a su vez conectadas a las tuberías principales. Pueden ser utilizados para irrigación de tierras cultivadas como de bosques.

Los dos sistemas principales de aplicación superficial son la irrigación por surcos y por inundación. En la irrigación por surcos el efluente circula por gravedad a través de los surcos desde los cuales se infiltra al terreno. En la irrigación por inundación, se preparan unas ondulaciones paralelas al suelo, de poca elevación, en dirección de la pendiente.

El sistema de drenaje consiste en cualquier tipo de conducto enterrado con juntas abiertas o perforaciones que recolectan y transportan el agua renovada que se ha filtrado a través del suelo durante el tratamiento. El drenaje debe bajar hasta el manto acuífero dentro de los primeros días tras la aplicación del efluente o una precipitación extraordinaria. Los sistemas de drenaje consisten generalmente en una red de tubos de drenaje enterrados entre 1 y 3 cm por debajo de la superficie e interceptados en un extremo del campo por una zanja de cierre el espacio entre drenes estará gobernado por la permeabilidad del suelo y por la profundidad del manto acuífero.

Tabla 4: Calidad esperada del agua tratada de los sistemas por aplicación al suelo.

Constituyente	Irrigación		Infiltración rápida		Escorrentía superficial	
	Media	Máx	Media	Máx	Media	Máx
DBO ₅ (mg/L)	< 2	<5	2	<5	10	<15
SST (mg/L)	< 1	<5	2	<5	0.8	<20
N Amoniacal (mgN/L)	<0.5	<2	0.5	<2	0.8	<2
N Kjeldahl Total (mgN/L)	3	<8	10	<20	3	<5
P Total (mgP/L)	<0.1	<0.3	1	<5	4	<6

El control de la escorrentía superficial en los sistemas de aplicación superficial, como la irrigación por surcos y por inundación, se suele aplicar el efluente haciéndolo discurrir sobre el terreno; esta agua excedente (varía entre el 10-40%) se suele recolectar y reutilizar por medio de una serie de zanjas de recolección, un pequeño depósito, una estación de bombeo y una tubería forzada hasta un pequeño tanque de almacenamiento o sistema de distribución. Los sistemas de irrigación pueden requerir alguna forma de control de la escorrentía pluvial cuando se producen precipitaciones de alta intensidad; la cantidad esperada dependerá de la capacidad de infiltración del suelo, la humedad anterior del suelo, la pendiente, el tipo de vegetación y la temperatura del aire y del suelo. La tabla 1 incluye una guía donde se pueden observar los posibles usos y los tratamientos; en la tabla 4 se presenta la calidad que debe tener el agua tratada por sistemas de aplicación al terreno.



Notas

1. Y. Tselentis y S. Alexopoulou, *Water Sci. Techn.* **33**, 127 (1996).
2. N. Havury, *Agri Ecosys. Environ.* **66**, 113 (1997).
3. M. Armienta y R. Rodríguez, *Environ. Health Perspectives* **103**, 47 (1995).
4. H.T. Adishesha *et al.*, *Water Sci. Techn.* **35**, 205 (1997).
5. J. Brown y E. P. Glenn, *Aquacultural Eng.* **20**, 91 (1999).

6. L. Jiantong *et al.*, *Ecological Eng.* **16**, 235 (1999).

7. L.B. Guo y E.E.H. Sims, *Bioresource Tech.* **72**, 243 (1999).

8. J.A. Brewe *et al.*, *Bioresource Tech.* **67**, 161 (1998).

9. Z. Gao *et al.*, *Water Sci. Techn.* **24**, 47 (1991)

10. A. Metcalf y J. Eddy, *Wateswater Treatment: Theory and Applications* (M. Dekker, Nueva York, 1979).

11.M.M. Pescod, FAO *Irrigation & Drainige* (Roma, 1992).

12. R. Armon *et al.* *Water Sci. Tech.* **30**, 239 (1994); H. Bouwer y E. Idelovitch, *Irrigation & Drainage Eng.* **113**, 516 (1987).

13. E. Cifuentes *et al.*, *Am. J. Tropical Medicine & Hygiene* **62**, 388 (2000); *Environmental Health Perspectives* **107**, 553 (1999).