

ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA AGUAS DE USO AGRICOLA

ANGELA CHAPARRO DE BARRERA¹

Introducción.

Cualquier proceso de desarrollo importante, inevitablemente, tiene implicaciones sobre el ambiente y sobre los recursos naturales de los cuales depende o a los cuales afecta. En Colombia, la floricultura se ha desarrollado en tiempo y espacio tan vertiginosos que no puede sustraerse a esta situación y, por esta razón es urgente analizar su impacto.

Es necesario llamar la atención sobre un aspecto relativo a una de las componentes vitales para el medio y para el desarrollo de la industria floral que es "el agua", para presentar algunas opciones de su manejo, para limpiar aquellas que ha sido servidas en la agricultura y en otras actividades de las fincas dedicadas al cultivo de flores para exportación.

Los esfuerzos para mejorar la producción de flores se ven limitados, entre otros factores, por la disponibilidad de agua y su control.

La planificación cuidadosa del riego es indispensable, para:

- Evitar graves problemas de salinización y alcalinización. Millones de hectáreas de tierra productiva se han convertido en desiertos salinos estériles, debido a la carencia de sistemas adecuados de drenaje.

- Evitar el agotamiento de los recursos hídricos freáticos y del subsuelo.

La constante extracción de agua para riego sin tener en cuenta las tasas de reposición natural, como ha sucedido, entre otras regiones, en Arabia Saudita, Israel, Sudáfrica, Texas, Arizona, el sur de California, la India y Perú, donde, después de un corto período de incremento en la producción, los rendimientos han descendido y, en algunos casos,

se ha llegado a la necesidad de abandonar la agricultura.

Marx y Engels advirtieron que la naturaleza se vengaría si se la descuidaba y, en cuanto mayor fuera el abuso, mayor sería la venganza. El problema central no es en cuál medida se usa el agua, sino quién la usa, con qué fines y cuáles son los cambios resultantes que condicionan la posibilidad de que otros la puedan usar.

Muchos países hacen lo posible, con enormes inversiones, por alcanzar el acceso fácil al agua potable. En todo el mundo, existen ejemplos de sistemas que han fracasado y que son monumentos a complicadas tecnologías. En Colombia, la mayoría de sistemas empleados para el tratamiento de aguas residuales ha dificultado su aplicación en áreas rurales y urbanas y, en general, en los países en vías de desarrollo, por el nivel técnico, los altos costos y, especialmente, por la dificultad de mantenerlos.

La experiencia que dejan los fracasos y el reconocimiento de que pueden desarrollarse sistemas efectivos de tratamiento, con inversiones factibles y el significativo mejoramiento en el nivel de vida de los afectados, ha conducido a mejorar las fuentes tradicionales sin recurrir a modernas instalaciones convencionales de tubería y de tratamiento del agua.

Si la industria de las flores quiere satisfacer la necesidad de un desarrollo independiente y ecológicamente seguro, debe sentar sus bases con respecto a la elección de las técnicas. En lugar de fomentar una indiscriminada proliferación de tecnologías foráneas importadas, conviene potenciar la adquisición de aquellas que sean estratégicas con efectos multiplicadores y que faciliten la independencia de la industria.

Conviene crear estímulos para desarrollar la capa-

¹ Profesora Asociada. Departamento de Biología. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C.

idad científica y tecnológica nativa, prioritariamente, sobre las medidas de transferencia tecnológica.

Teniendo como base estas ideas, presento "algunas alternativas de tratamiento para aguas de uso agrícola". Esta es la oportunidad para poner en consideración de los floricultores, de la industria y de la comunidad científica en general, algunos resultados experimentales de la investigación realizada en forma conjunta en las Facultades de Ciencias e Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia.

La mayoría de los sistemas empleados para el tratamiento de aguas residuales en el país es de difícil aplicación en áreas rurales y urbanas, por los altos costos y por el nivel técnico necesario para aplicar, operar y mantener sistemas de tratamiento convencional. El incremento del volumen de desechos líquidos, descargado en fuentes de agua receptoras, causa su contaminación en los cursos de agua y un severo impacto ecológico y social.

La situación planteada y los resultados obtenidos con el modelo en otros países motivó la realización de una investigación, la cual se desarrolló con el objetivo de evaluar la efectividad de una modalidad de hidroponía o sea, la Técnica de la película nutritiva (TPN) aplicada a un cultivo de Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), como posible alternativa para tratar aguas residuales de uso doméstico propuesta por Arjona (1987).

En el tratamiento de aguas residuales se ha utilizado Jacinto de agua (*Eichhornia crasipes*). Se trata de una planta que tiene pecíolos y pedúnculos esponjosos y abultados, su base llena de bolsas de aire formando un flotador y la roseta de pecíolos forma un círculo de flotadores que evitan que la planta zozobre. Cuando varias plantas están juntas, los pecíolos están menos inflados y son más altos y delgados, en forma tal que una hectárea puede contener 360 a 480 toneladas de jacintos. La flor blanca o lila en una espiga central blanca o lila, si no ha sido polinizada por un insecto después de 48 horas de antesis, se autopoliniza y en tres semanas, las semillas maduran. Las flores se inclinan y dejan caer en el fondo fangoso las pesadas semillas (más densas que el agua), donde pueden permanecer viables por varios años; así, éstas constituyen un proceso reproductivo de soporte, puesto que el proceso reproductivo principal es la forma vegetativa, a partir de rizomas.

La temperatura óptima de crecimiento es de 26 a 30°C. En condiciones favorables, en diez días se puede duplicar su población y, en caso de helada, mueren las hojas exteriores, pero, a menos que haya congelamiento por largo tiempo, el rizoma es viable y responde a cambios favorables de temperatura.

Las raíces del jacinto permanecen suspendidas en el agua en máximo contacto con el medio de donde extraen los nutrientes que le son necesarios. Cuando el N, P y K van a las corrientes de agua, a través de las escorrentías agrícolas, las aguas residuales o los efluentes industriales, son considerados contaminantes y son irrecuperables. El Jacinto absorbe estos y otros productos químicos en grandes cantidades y los utiliza para su crecimiento y reproducción o los concentra en el tejido radical. Cuando la planta se cosecha en forma sistemática, para que haya continuidad en la absorción, se convierte en un agente natural de control de contaminación del agua, que reduce la DBO y los sólidos totales suspendidos en el medio.

Sin embargo, si la cosecha no es sistemática, puede causar problemas por su rápida proliferación, ocasionando alteraciones en la calidad del agua por incremento de la materia orgánica, disminución de oxígeno disuelto, la reducción en la penetración de luz, el aumento de evapotranspiración, la proliferación de insectos y vectores de enfermedades y la sedimentación.

Otros sistemas de tratamiento para aguas residuales se han reconocido a lo largo de la historia del mundo. El tratamiento de "Flujo superficial" utiliza, principalmente, macrófitas terrestres como *Brachiaria* sp., *Panicum repens* y *Oriza sativa*.

En Melbourne (Australia), el sistema opera desde 1987, cubre 10.800 hectáreas y trata 200 millones de m³ de agua/año y su instalación, mantenimiento y operación es de bajo costo y permite alta productividad agropecuaria. En Tabio (Cundinamarca), Lleras y Lleras Ltda., entre 1981-1982, probaron el Kikuyo en un flujo de 0,5 m³/m²/día y en un área de 1.000m² removieron 60% de DBO, 70% de sólidos suspendidos y 45% de sólidos totales. Sus autores concluyen que la remoción es mayor, cuanto menor sea la tasa de aplicación.

Los hidropónicos constituyen una alternativa de cultivo para especies terrestres con rendimientos mayores que cuando se cultiva en suelo. Adicionalmente, es posible sustituir la solución nutritiva por agua residual.

Una modalidad de la hidroponía, desarrollada en el "Glasshouse Research Institute" (Inglaterra) por Allan y Cooper en 1965, es la Técnica de la Película Nutritiva (TPN), la cual se caracteriza porque las raíces se encuentran sobre el fondo plano, impermeable y ligeramente inclinado de los hidrocanales, a través de los cuales, fluye uniforme y unidireccionalmente una fina lámina de solución nutritiva. Para una adecuada oxigenación sin oxidación, es necesario que el sistema radical este parcialmente sumergido en la solución nutritiva y el resto esté en contacto con la atmósfera. Penningsfeld y Kurzman

(1983) recomiendan un flujo de 1 a 4 litros por minuto.

La TPN se ha probado, en cultivos hortenses (frijol, guisante, tomate, lechuga, rábano), en plantas ornamentales (poinsetia, geranio, clavel, crisantemo) y en aromáticas, en más de 68 países. El funcionamiento de la TPN depende de la energía solar. Su funcionalidad, como sistema de tratamiento de aguas residuales radica en la formación de una densa matriz de raíces que actúa como filtro para retener sólidos en suspensión y ofrece soporte para el crecimiento de microorganismos aeróbicos, degradadores de residuos presentes en el agua para tratar y las plantas, por absorción radical, remueven nutrientes y metales pesados.

La TPN es económica, por que, con una inversión mínima de instalación, mantenimiento y operación (como combustible utiliza la energía solar y el sistema filtrante puede transformarse en forraje o compost), permite mejorar la calidad del agua, convirtiéndose en una alternativa importante de reciclaje y de reutilización de aguas residuales sin recurrir a modernas y costosas instalaciones convencionales para el tratamiento.

Comparando los niveles de producción de cultivos irrigados con aguas residuales y con solución nutritiva sintética, Sias y Nevin (1973) establecieron la capacidad de las aguas residuales para suplir las demandas nutricionales y lograr buena producción en cultivos de tomate, frijol enano, remolacha azucarera y rábano, demostrando la potencialidad de éstas como fuente de nutrientes, con la ventaja adicional de la reducción en los costos.

En 1978, el diseño de un sistema para irrigar un cultivo de tomate bajo invernadero y un pastizal a la intemperie con aguas residuales domésticas permitió demostrar que la concentración de nutrientes es mayor en las soluciones nutritivas sintéticas que en el efluente, pero, en éstos, los elementos están en forma más accesible a las plantas y, por lo tanto, no se presentan síntomas de deficiencia y los metales pesados detectados en baja concentración tienden a acumularse en las hojas, y los virus y bacterias quedan bloqueados en las raíces.

En el Laboratorio de Medicina Nuclear y Radiación Biológica de la Universidad de California, se demostró que, en las aguas residuales, los nutrientes están en forma utilizable y que especies como *Lycopersicon esculentum*, *Cucumis sativus*, *Lactuca sativa*, *Chrysanthemum morifolium*, *Solanum melongena* y *Capsicum frutescens* no requieren fuente adicional de energía para lograr producciones comparables a las obtenidas con hidroponía comercial. Cuando se conoce la presencia de alguna deficiencia, puede enriquecerse artificialmente,

como ellos lo hicieron, adicionando Fe y Mn o acidificándolas para hacerlas disponibles.

La utilización de la TPN, como sistema de tratamiento empleando gramíneas, se reporta inicialmente en 1981. El Laboratorio de Investigación para las regiones frías de la Armada Norteamericana (CRREL) trabajó con *Phalaris arundinacea* en 2 canales aplicados intermitentemente, bajo invernadero. Los resultados fueron excelentes en cuanto a remoción y producción del pasto.

En Colombia, en trabajos conjuntos de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) y la Universidad Nacional de Colombia, se ha probado el pasto Pará bajo invernadero, con el fin de tratar aguas procedentes del beneficio del café, lo mismo que la efectividad de otras gramíneas en tratamiento de aguas residuales domésticas

Metodología.

La investigación se realizó, en la Estación de Bombeo "El Salitre", de propiedad de la EAAB. Se utilizó pasto kikuyo por ser la gramínea mejor adaptada y más difundida en la región andina de Colombia, donde constituye la principal fuente de alimento para levante y engorde de ganado y para prados en general. Su producción depende de la fertilización y del período entre podas y oscila entre 1,27 y 13,5 toneladas de materia seca por hectárea y por corte.

Para el tratamiento TPN, el agua pasa de un tanque desarenador, a través de un vertedero rectangular, al tanque de distribución, donde el nivel del líquido puede ser controlado manualmente a través de un canal de desfogue. Un vertedero rectangular conduce el agua a la cámara de quietamiento la cual saca un flujo uniforme para alimentar un canal de cultivo hidropónico.

El canal de mortero tiene 20 m de largo x 0,53 m de ancho y 0,2 m de profundidad y su pendiente 0.3%. Allí, se sembró el material experimental que consistió en 32 cespedones de Kikuyo de 50 cm x 50 cm muy uniformes y con poco suelo acumulado en la matriz radical. Para el crecimiento del pasto, se permitió un área libre de 10 cm entre cespedones.

Se suministraron 1,74 litros por minuto y el ensayo se prolongó durante 4 meses. Para la evaluación, el canal se dividió en dos secciones, cada una con 16 cespedones. Las muestras de agua se tomaron en el afluente, entre la primera y la segunda sección, y en el punto efluente.

Después de la aclimatación del pasto, se pudo para establecer el tiempo cero. Durante este tiempo, se evaluaron las muestras de agua a intervalos semanales, para determinar la capacidad depuradora del sistema.

Resultados.

El caudal de operación permitió tratar 1.253 litros/día y el TRH varió de 38 minutos al iniciar la fase experimental hasta 50 minutos al finalizarla.

La capacidad depuradora del sistema, al pasar del incremento de la película biológica que podría contribuir a la remoción de componentes químicos, físicos o biológicos del agua no presentó una tendencia definida en tiempo ni en espacio.

La formación de la película biológica fue mayor en los cespedones más cercanos al afluente y disminuyó gradualmente a lo largo del canal. Esta acumulación en los dos primeros cespedones fue tan intensa que causó una disminución en el crecimiento del pasto en términos de altura, a partir de los 50 días de iniciada la investigación. La altura del follaje fue mayor en el segundo cespedón y, desde éste, disminuyó gradualmente hacia el efluente.

El Cuadro 1 presenta los valores promedios de algunas variables físicoquímicas del agua a nivel del afluente, del punto medio y del efluente. La acidez y la alcalinidad totales, la dureza magnésica y la conductividad eléctrica disminuyeron progresivamente a lo largo del canal. Por el contrario, las durezas total y cálcica se incrementaron, debido a la composición del canal que aportó calcio al sistema. No obstante las remociones, el se mantuvo relativa-

mente constante, característica muy importante, pues demuestra la capacidad amortiguadora del sistema.

La intensidad de las respectivas remociones varió en cada caso, pues, en algunos casos, fue mayor en la primera sección del canal y lo contrario en otros, pero los porcentajes totales son muy importantes para el proceso depurador de aguas residuales por medios biológicos.

Se destaca la efectividad del sistema para remover salinidad (Conductividad eléctrica) a lo largo del canal. Se observa disminución de 556 a 405 Mmhos/cm. Esta potencialidad puede ser explotada en grandes áreas de suelos agrícolas que presentan tendencia a salinizarse. También, se destacan la remoción de la alcalinidad y el alto porcentaje de dureza cálcica que fue removido.

Algunas características físicas del agua, como la turbiedad y la presencia de sólidos totales, filtrados y solubles, también, se vio afectada favorablemente por el sistema de TPN ensayado. Si se considera que las remociones fueron muy importantes en todos los casos, los resultados demuestran la efectividad de la TPN.

Se ha descrito que, en los canales, la masa de raíces de los vegetales empleados se apreta densamente, constituyendo una especie de colchón

CUADRO 1. Variación promedia de algunas variables físicas y de remociones ejercidas por el sistema TPN.

	Afluente	Punto Medio	Efluente	Primera	Segunda	Remoción total (%)
Acidez Total	40,00	27,00	22,00	31,21	17,25	41,54
Alcalinidad Total	169,00	144,00	123,00	14,29	15,55	26,99
pH	7,13	7,14	7,14			
Dur. Tot. CaCO ₃ ppm	1,00	70,00	80,00	36,99	14,86	56,93
Dureza Ca CaCO ₃ ppm	38,56	63,11	72,44	67,70	14,90	93,70
Dureza Mg	11,44	7,56	6,56	29,07	10,28	32,59
Cond. Ele Mmhos/cm	556,00	465,00	405,0	15,93	13,05	26,74

CUADRO 2. Variación promedia de la turbiedad y de la concentración de sólidos suspendidos totales y filtrables en el agua residual. Remociones ejercidas por el sistema TPN.

	Afluente	Punto Medio	Efluente	Primera	Segunda	Remoción total (%)
Turbiedad ppm SiO	2112,00	45,00	28,00	58,74	36,80	74,38
Sol. Susp ppm	212,00	85,00	52,00	59,19	37,00	73,44
Sol. Filt ppm	280,00	237,00	234,00	13,58	0,76	15,04
Sol. Tota ppm	492,00	320,00	285,00	34,53	10,35	41,75

filtrante. Así, mediante procesos netamente físicos, se retienen los sólidos suspendidos que constituyen la turbiedad. Por otra parte, los sólidos solubles se retienen por procesos de adsorción y absorción.

La presencia de algunos elementos químicos, presentes como contaminantes de las aguas residuales se presenta en el Cuadro 3, donde se observa que el nitrógeno amoniacal, el fósforo (ortofosfatos), el potasio y el hierro disminuyen marcadamente a lo largo del canal.

El nitrógeno es vertido en las aguas residuales, generalmente en forma orgánica, úrea y proteínas. Estas moléculas, por acción de las bacterias saprófitas, son degradadas a formas iónicas más simples como amoníaco, el cual, también, es oxidado a nitritos por bacterias nitrificantes (*Nitrosomonas*) y, posteriormente, las bacterias del género *Nitrobacter* los convierten en nitratos.

El sistema TPN demostró gran eficiencia para remover nitrógeno en forma de amonio, principalmente por absorción radical. En condición anaeróbica, parte del amonio puede convertirse en nitritos, situación que explica el incremento de esta variable a lo largo del canal.

Los ortofosfatos, el potasio y el hierro disminuyeron hacia el efluente. El porcentaje de remoción fué mayor en la primera sección del canal y, en todos los casos, el porcentaje fué mayor del 50%.

En un agua residual doméstica, el 75% de la con-

centración de sólidos suspendidos y el 40% de los filtrables son de naturaleza orgánica. Sobre una muestra total y filtrada se determinó la cantidad de oxígeno necesaria para que los microorganismos oxiden la materia orgánica en un período de 5 días a 20°C. La diferencia dió la DBO no soluble, variable que, también, disminuyó desde el afluente hacia el efluente y cuyo porcentaje de remoción fué notoriamente mayor en la primera sección que en la segunda.

El comportamiento de la DQO (cantidad de oxígeno necesario para la oxidación de la materia orgánica del agua en presencia de $K_2Cr_2O_7$ en medio ácido y a alta temperatura) presentó tendencia similar a la DBO.

Los principales representantes de los grupos de microorganismos indicadores de contaminación fecal son *Streptococcus*, *Clostridium* y *Escherichia*. Los primeros mueren rápidamente fuera del huésped, así su presencia, sólo, se detecta cuando las heces son recientes; las esporas de *Clostridium perfringens* permanecen largo tiempo en el agua y *Escherichia coli*, miembro principal del grupo coliforme, es, por excelencia, indicador de la contaminación fecal.

La remoción ejercida por el sistema fué irregular y baja. Sin embargo, experimentalmente, Bouzon y Palazzo (1982) lograron valores hasta del 90% atribuibles a filtración, predación de microorganismos mayores, efecto de radiación ultravioleta o

CUADRO 3. Variación promedio en la concentración de algunos iones (ppm) en el agua residual y en las remociones ejercidas por el sistema de tratamiento TPN.

	Afluente	Punto Medio	Efluente	Primera	Segunda	Remoción total(%)
Amonio	3,20	16,40	8,60	45,25	50,25	72,66
Nitritos	0,003	0,005	0,008			
Ortofosfatos	4,08	2,39	1,56	39,43	35,38	60,46
Potasio	14,43	9,57	7,11	33,69	25,91	52,31
Hierro	4,12	2,49	1,44	38,29	34,80	60,80

CUADRO 4. Variación promedia de la DBO₅ y DQO (ppm) del agua residual. Remociones ejercidas por el sistema de tratamiento TPN

	Afluente	Punto Medio	Efluente	Primera	Segunda	Remoción total(%)
DBO ₅ Total	204,00	75,00	53,00	61,85	27,24	72,42
DBO ₅ filtrable	107,00	53,00	41,00	49,72	22,50	60,60
DBO ₅ no soluble	99,00	20,00	8,00	79,43	56,00	90,84
DQO total	476,00	219,00	165,00	23,19	22,51	65,46

CUADRO 5. Variación en el recuento total de coliformes fecales del agua residual y de las remociones ejercidas por el sistema de tratamiento TPN

	Afluente	Punto Medio	Efluente	Primera	Segunda	Remoción total(%)
Coliforme log col/ 100 ml	7,00	6,69	6,49	3,88	2,96	7,01

CUADRO 6. Variación promedia en el contenido de cadmio y cromo (ppm) en el agua residual y en las remociones ejercidas por el sistema TPN

	Afluente	Punto Medio	Efluente	Primera	Segunda	Remoción total(%)
Cd (ppm)	0,007	0,007	0,007			
Cr (ppm)	0,090	0,030	0,020	57,680	29,11	69,40

deseccación en los períodos de intermitencia en el tratamiento.

Los metales pesados se encuentran en aguas residuales industriales. En el caso que se estudia (aguas domésticas), los valores fueron muy bajos y se mantuvieron constantes y no se observó efecto de remoción, aunque el cromo fué removido del sistema en un 59,4% y con mayor eficiencia en la primera sección del canal.

Conclusiones.

El kikuyo se adaptó al nuevo sustrato de crecimiento y no presentó síntomas de "stress"; en el primer cespedón, sólo, se presentó una ligera necrosis apical de las hojas, causada más por senescencia que por otro factor. Los crecimientos foliar y radical fueron intensos hacia el afluente y decrecieron hacia el efluente, debido, posiblemente, a un gradiente de concentración de nutrientes creado durante la experimentación.

Los sólidos del agua residual saturaron el sistema radical del primer cespedón cercano al afluente,

mejorando su capacidad filtrante. En general, hay remoción de iones y elementos que contribuyen a la contaminación del agua servida a lo largo del canal.

El tratamiento de aguas residuales por medios biológicos es uno de los conceptos más prometedoros, dada su simplicidad, bajo costo y capacidad de convertir contaminantes indeseables en productos de utilidad como energía, abono, sustancias alimenticias e, inclusive, en más flores.

Bibliografía.

1. Arjona, B. Evaluación de un cultivo hidropónico de *Pennisetum clandestinum* Hochst (kikuyo) como tratamiento biológico para aguas residuales domésticas. Tesis de Grado. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 1987.
2. Bouzoun, J.R. and A.J. Palazzo. Preliminary assessment of the nutrient film technique for waste water treatment. Special Report of Cold Regions Research. Engineering Laboratory of the U.S.A. Army. 13p. 1982.
3. Lleras y Lleras Ltda. Investigación sobre biofiltros vegetales. Resumen de resultados. Documento presentado a la CAR. 10p. 1981.
4. Wolverton, B.C. El jacinto de agua. Mazingira. Foro mundial sobre medio ambiente y desarrollo 11: 58-65. 1979.