



Tecnologías verdes para el aprovechamiento de aguas residuales urbanas: análisis económico

doi: 10.4136/ambi-agua.1174

Received: 23-Aug. 13; Accepted: 10 Oct. 2013

Horacio Alfredo Gil¹; José Manuel Cisneros¹; Jorge Dante de Prada¹;
José Omar Plevich¹; Angel Ramon Sanchez Delgado^{2*}

¹Universidad Nacional de Rio Cuarto - Córdoba, Argentina

Departamento de Producción Vegetal de la Facultad de Agronomía y Veterinaria

²Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Departamento de Matemática

*Autor correspondente: e-mail: asanchez@ufrj.br,

hgil@ayv.unrc.edu.ar, jcisneros@ayv.unrc.edu.ar,

jdeprada@ayv.unrc.edu.ar, oplevich@ayv.unrc.edu.ar

RESUMEN

Las aguas residuales urbanas son uno de los mayores contaminantes del recurso hídrico. Para su tratamiento, lo usual son las tecnologías convencionales basadas en la ingeniería civil e hidráulica (TC); más recientemente, se ha comenzado a valorizar las llamadas tecnologías verdes (TV) basadas en la biología y la ecología. El objetivo de este trabajo fue evaluar el comportamiento económico de estas tecnologías utilizando el análisis beneficio-costos para tres situaciones contrastantes. Los beneficios económicos se derivan de la venta de los productos vegetales y los beneficios ambientales de la descontaminación del agua, valorada por el método del costo evitado. Se pudo observar que las TV tienen mejor desempeño comercial y económico que las TC y que la inclusión del beneficio ambiental, mejora significativamente los resultados obtenidos.

Palabras claves: contaminación de agua, beneficio ambiental, saneamiento ambiental.

Tecnologias verdes no reuso de águas residuais urbanas: análise econômica

RESUMO

As águas residuais urbanas representam um dos maiores contaminantes hídricos. Para seu tratamento, o usual são as tecnologias convencionais baseadas na engenharia civil e hidráulica (TC); mas, recentemente, tem-se valorizado as chamadas tecnologias verdes (TV) baseadas na biologia e a ecologia. O objetivo do trabalho foi avaliar o comportamento econômico destas tecnologias utilizando a análise de benefício-custo para três situações contrastantes. Os benefícios econômicos são derivados da venda dos produtos vegetais e os benefícios ambientais pela descontaminação da água, valorizada pelo método de custos evitados. Pode-se observar que as tecnologias verdes têm melhor desempenho comercial e econômico que as tecnologias convencionais e que a inclusão do benefício ambiental melhora significativamente os resultados.

Palavras-chave: contaminação da água, benefício ambiental, saneamento ambiental.

Green technologies for the use of urban wastewater: economic analysis

ABSTRACT

Urban sewage is one of the biggest polluters of water resources. For treatment, the usual conventional technologies (CT) are based on civil and hydraulic engineering; more recently, green technologies (GT) based on biology and ecology began to be developed. The aim of this study was to assess the economic aspects of these technologies using cost-benefit analysis. The economic benefits are derived from the sale of forest products and the environmental benefits of water decontamination, valued by the avoided cost method. The results of the study establish that GT have better commercial and economic performance than CT, and that the inclusion of environmental benefit significantly improves the results.

Keywords: water pollution, environmental benefit, urban sanitation.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del ambiente y específicamente del agua ha sido y es un problema importante a nivel mundial. Los nitritos, nitratos, fosfatos, materias orgánicas, detergentes, hidrocarburos, agentes patógenos, metales, y sustancias conservativas que forman parte de los efluentes cloacales son una de las mayores fuentes contaminantes del agua. Argentina no escapa al problema de la contaminación del agua. Por ejemplo, en el sur de Córdoba existen un número importante de poblaciones donde no se realizan tratamientos de los efluentes cloacales domiciliarios ni industriales (Becerra et al., 1998), siendo estas fuentes de contaminación de aguas subterráneas y superficiales. Esta contaminación causa problemas de salud ambiental y también en algunos casos contaminación del agua destinada para consumo humano y animal, con el riesgo sanitario asociado.

La clásica solución para el tratamiento de aguas residuales urbanas ha sido la utilización de métodos convencionales de saneamiento urbanos, donde se recolectan, concentran, almacenan y tratan las aguas residuales urbanas sobre la base de conocimientos de la ingeniería hidráulica y en obras que normalmente descargan las aguas tratadas en cursos permanentes de agua. Sin embargo, estas obras han tenido una escasa adopción en el sur de Córdoba (Argentina), donde las poblaciones no superan los 25.000 habitantes. En estas poblaciones, las posibilidades de recolección, concentración y tratamiento de aguas residuales urbanas se encuentran limitadas por los costos de inversión de estas instalaciones, por la inexistencia de cursos permanentes de agua donde puedan descargarse las aguas residuales urbanas tratadas y por la falta de una conciencia ambiental y/o decisión política de los líderes de las comunidades para resolver los problemas ambientales.

Además de los tratamientos convencionales de las aguas residuales urbanas, se están generando tecnologías alternativas diseñadas sobre principios ecológicos y biológicos, que permiten complementar o sustituir obras civiles-estructurales para el tratamiento de las aguas residuales urbanas (Bertoncini, 2008). A nivel mundial se afianza la tendencia del uso de aguas residuales urbanas en la agricultura. Dentro de estas alternativas se encuentran las llamadas tecnologías verdes o métodos de escampamento superficial del agua por rambla, en terrenos cubiertos de vegetación natural y de cultivos agrícolas, o plantaciones forestales, sobre el que se depositan periódicamente aguas residuales procedentes de industrias o de núcleos urbanos, con el fin de conseguir su depuración mediante la acción conjunta del suelo, microorganismos y plantas, mediante una acción física, química, bioquímica y biológica (Matos et al., 2005).

Las tecnologías verdes son consideradas compatibles con la preservación y mejoramiento del ambiente, posibilitando el aprovechamiento del agua y nutrientes provenientes del agua tratada para la producción de fibras, maderas y alimentos (Fasciolo et al., 2002; Varallo et al.,

2011; Plevich et al., 2012). Estas tecnologías constituyen una alternativa para obras de menor escala y/o en lugares donde los residuos líquidos no tienen lugar para su evacuación. También permiten escalar las inversiones del tratamiento total de las aguas residuales urbanas.

En el sur de la provincia de Córdoba, las tecnologías verdes se han aplicado en explotaciones agropecuarias tamberas y porcinas, utilizando aguas residuales provenientes de salas de ordeño o galpones de cría, recría y terminación de cerdos (Santalla e FAC, 2008). Frecuentemente, el efluente residual sin tratamiento se utiliza para el riego superficial de pasturas. También, existen operando tecnologías verdes para el tratamiento de aguas residuales urbanas con producción de madera en las localidades de Adelia María, General Deheza y Río Cuarto. La Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC) ha desarrollado una planta piloto de tratamiento de aguas residuales de las residencias universitarias y uno de los usos ha sido el riego de cultivos agrícolas (Crespi et al., 2005).

Aunque la preservación ambiental es una de las principales causas del desarrollo de las tecnologías verdes y el argumento económico frecuentemente se incluye, la viabilidad económica de éstas, ha sido poco tratada y puede constituir uno de los elementos relevantes para la transferencia y adopción de las mismas. Estas tecnologías de descontaminación del agua proveen un bien de naturaleza pública que no tiene mercado, la identificación de los beneficios económicos y su valoración han sido normalmente ignorados o solamente basados en la valoración de algún producto comercial, como la madera, el forraje seco o los granos. Esto implica una subvaloración económica de las tecnologías verdes que puede confundir el proceso de decisiones y la asignación de recursos públicos para resolver problemas ambientales.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la viabilidad económica de las tecnologías verdes cuando se consideran los beneficios derivados de productos comerciales y los derivados de los servicios ambientales sobre tres casos en la provincia de Córdoba.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Los tres casos estudiados están localizados en el sur de la Provincia de Córdoba, Argentina. El primer caso se ubica en la localidad de Adelia María (Córdoba), con una población de 6.500 habitantes. Esta localidad no cuenta con cursos de aguas permanentes que permitan recibir los efluentes y la napa freática tiene una profundidad de 12 a 16m. Hasta el final de los años 90, la técnica utilizada eran los “pozos negros”. Las aguas residuales de los hogares se colocaban en pozos realizados en proximidad de la vivienda, sin tratamiento. La localidad inicio el tratamiento de efluentes cloacales con una planta provista de un filtro de reja, lagunas facultativas de estabilización y filtros verdes (forestación) como cuerpo receptor de los efluentes tratados. El volumen estimado de aguas residuales fue de $510 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$ para las 680 conexiones. La forestación y sistema de riego abarca un área de 16 ha. La planta cuenta además con un sistema de lagunas de estabilización u oxigenación, donde se biodegradan las aguas de manera natural con ayuda de compuestos químicos apropiados.

El segundo caso se ubica en la ciudad de Río Cuarto (Córdoba-Argentina) que posee una población de aproximadamente 160.000 habitantes y donde el 75% cuenta con servicio de cloacas. El vertido diario de efluentes alcanza en promedio los 30.000 m^3 . Este vertido llega a una antigua planta de tratamiento primario y secundario que fue puesta en funcionamiento, luego de 30 años de inactividad, periodo en el cual los efluentes eran vertidos al cauce del río Cuarto sin tratamiento alguno. Fue en el 2003 que la empresa Municipal de Obras Sanitarias, formalizó un protocolo de trabajo con la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC), para el diseño e implementación de un filtro verde forestal. La superficie de filtro verde (forestación) requerido para captar todo el vertido de la Ciudad se estiman en 360 ha (Cisneros et al., 2003).

El tercer caso se ubica en las residencias estudiantiles de la UNRC, donde se encuentra instalada una planta piloto de tratamiento de los efluentes (Crespi et al., 2005). En la planta se tratan 100 m³ de efluentes diarios. La planta cuenta con un sistema de colección de efluentes conducidos a un reactor biológico de 600 m³, luego pasan a una pileta de maduración con la misma capacidad y posteriormente son almacenados los efluentes en una pileta de 2400 m³. El efluente tratado finalmente es usado para regar un filtro verde de 10 ha, con doble cultivo: soja-colza.

El análisis beneficios costos se utiliza para juzgar la viabilidad comercial y económica de los tres casos con depuración de efluentes cloacales mediante filtros verdes. En el contexto de este trabajo se entiende por viabilidad comercial a los resultados obtenidos de la implementación de los filtros verdes destinados al mercado, y por viabilidad económica, los resultados comerciales más el beneficio generado por la depuración del efluente tratado realizado por el filtro verde. El indicador utilizado es el valor actual neto comercial – VANC - y el valor actual neto económico VAN (Contreras, 2004).

El método de valoración económica del filtro verde considera aquellas inversiones y gastos que son evitadas por la no instalación de un sistema de tratamiento terciario convencional, o en otras palabras, los costos evitados (para mayores detalles ver Woodward y Wui, 2001, Brander et al., 2006). Específicamente, para la valoración de los servicios ambientales seguimos el trabajo de Ko et al. (2004). La comparación entre tecnologías verdes y convencionales se realizó solo para el tratamiento terciario, depuración del efluente tratado. El filtro verde utiliza tanto el agua como los nutrientes fosfato y nitrato presentes en los efluentes de tratamiento secundario y los transforma en una producción primaria neta de madera, granos etc. con valor comercial, pero además reduce la contaminación ambiental.

Las inversiones y costos operación de aquellos productos comerciales, se valoran a precio constante, promedio año 2000 (tipo de cambio: 1 peso igual 1 dólar). Los datos sobre gastos de inversiones y operación para el filtro verde se muestran en la Tabla 1. Los datos fueron provistos por los entes que gestionan los efluentes e información secundaria. La estructura de costos para la forestación y labores culturales de la plantación, fue elaborada a partir de la SAGPyA Forestal (2002). El crecimiento y la producción de la plantación en el filtro verde fue estimada a través de diferentes antecedentes de cultivos de salicáceas, bajo riego y con riego de efluentes (Cisneros et al., 2003).

Las necesidades de agua del cultivo forestal para cada época del año y los programas de riego fueron determinados mediante el software CropWat 4.3 - Windows (FAO 1998). Para el caso 1, la cosecha se realiza en tres periodos, en el año 4 se realiza el raleo, con una producción estimada en 688 toneladas (ton.), en el año 24, se realiza un segundo aprovechamiento con una producción estimada de 5.966 ton., la tala final se realiza en el año 30 con una producción de 1.491 ton.; el precio de venta estimado es de 50\$ ton.⁻¹. Para el caso 2, la cosecha se realiza también en tres periodos, año 4 con una producción estimada en 14.177 ton, años 20 y 30 con producción estimada en 124.731 para ambos años; el precio de venta estimado es de 65 \$ ton.⁻¹ Finalmente el caso 3 dedicado a un doble cultivo, la producción estimada para soja es de 3,47 ton ha⁻¹ y la de colza en 2,57 ton ha⁻¹, el precio de venta fue de 252 \$ ton⁻¹ y de 227 \$ ton⁻¹, respectivamente.

Para evaluar la depuración del efluente tratado, equivalente, al tratamiento terciario se utilizaron datos de inversiones y costos operacionales considerando una planta tratamiento convencional. En la Tabla 2 se muestran los montos de inversión y costos de operación de la planta de tratamiento convencional. Los datos fueron tomados del trabajo realizado por Ko et al., 2004, y ajustado por el volumen de efluente. Para el primer caso, los gastos e inversiones de la planta de tratamiento terciario, se estimó como en Ko et al. (2004) los parámetros físicos con precios locales de energía, combustibles y personal. Para los otros dos casos estudiados (Ciudad de Río Cuarto y Residencias Universitarias de la UNRC), que

poseen volúmenes de efluentes diferentes, el cálculo de la inversión de las plantas de tratamiento terciario, se estimó a partir del costo de inversión y operación por m³ tratado en la mencionada planta, como si la inversión respondiera a una función lineal

Tabla 1. Inversiones y costos operativos de tecnologías verdes.

Inversiones	CASO 1_ \$	CASO 2_ \$	CASO 3_ \$
Tierra	32.000	1.440.000	50.000
Movimiento de tierra		51.419	2.262
Equipo de riego	26.848	526.577	6.000
Compra de estacas		69.694	
Siembra de pasturas		23.702	
Equipamiento	13.027	106.871	
Total inversiones	71.875	2.218.263	58.262
Costos de operación	\$ año⁻¹	\$ año⁻¹	\$ año⁻¹
Electricidad	1.119	115141	
Personal	6.059	174394	
Combustible y lubricantes	2.517	35436	
Insumos		16938	
Mantenimiento y reparaciones		36913	
Cultivo de soja			3.381
Cultivo de colza			2.364
Total costos de operación	9.695	378.822	5.745

Fuente: los datos de los casos 1, 2, y 3 fueron provistos por administración de las entidades: Cooperativa Telefónica de Adelia María, Ente Municipal de Obras Sanitaria de Río Cuarto y Planta de tratamiento de las residencias de la Universidad Nacional de Río Cuarto respectivamente.

Tabla 2. Inversiones y costos operativos de la planta de tratamiento terciario por casos.

Inversiones	CASO 1_ \$	CASO 2_ \$	CASO 3_ \$
Tierras	1.000	1.000	1.000
Equipamiento	896.971	7.109.413	23.698
Tanque de almacenamiento	30.186	239.255	798
Instalaciones	324.505	2.572.034	8.573
Espesador de lodos	72.461	574.328	1.914
Planta de secado de lodo	137.676	1.091.223	3.630
Ingeniería y contingencia	438.540	3.475.876	11.586
Total inversiones	1.900.339	15.062.130	50.200
Costos operación	\$ año⁻¹	\$ año⁻¹	\$ año⁻¹
Mantenimiento y reparaciones	77.534	614.536	2.048
Energía eléctrica	4.935	39.115	160
Personal	13.000	103.038	34 El tercer
Insumos	2.084	16.518	55
Depósito de lodos secos	3.513	27.844	93
Total costosde operación	101.066	801.052	2.700

Fuente: elaborado considerando los datos de Ko *et al.*, 2004.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La composición del capital varía sustancialmente entre la planta convencional y el filtro verde dependiendo del valor de la tierra, localización. En la Tabla 3, se muestra que las inversiones de capital estimadas en los sistemas de tratamiento terciarios son significativamente mayores que las realizadas para los filtros verdes; mientras que las inversiones en tierras son mayores para estos últimos. En los casos 1 (Adelia María) y 2 (Río Cuarto), la inversión total para el sistema de tratamiento terciario mediante filtros de arena supera por más de diez veces las necesidades de inversión para el filtro verde; en cuanto que en el caso 3 (Residencias Universitarias), las inversiones totales son algo mayor en el filtro verde. En el caso 3, el filtro verde está localizado prácticamente en tierras urbanas con un valor unitario de la tierra que duplica el caso 1, y es al menos 20% mayor que el caso 2.

Por lo tanto, la inversión total depende sustancialmente del valor de la tierra. Esto muestra clara ventajas para los filtros verdes en las comunidades que tienen tierras utilizadas en formas extensivas, como agricultura, ganadería o forestación, versus aquellos casos en que las tierras están destinadas a usos más intensivos; por ejemplo, desarrollo urbano, donde posiblemente los sistemas de tratamiento terciario presenten cierta ventaja porque ocupan menos espacio. En los casos 1 y 2, el costo de operación es sustancialmente mayor en la planta de tratamiento terciario debido a la utilización de insumos y energía para forzar el proceso de filtración. En el filtro verde, la fuente de energía es solar y los procesos de filtración y reducción de nutrientes son procesos naturales.

Tabla 3. Inversiones y costos operativos de tecnologías verdes y tecnología convencional (Tratamiento Terciario).

TV Tratamiento	Inversión de capital	Valor de la tierra	Inversión total	Costo operación (anual)	VACO	VACT
Caso 1: planta de tratamiento de efluentes Adelia María						
Forestación	\$ 39.875	\$ 32.000	\$ 71.875	\$ 9.695	\$ 109.143	\$ 181.018
Tratamiento terciario	\$ 1.900.339	\$ 1.000	\$ 1.901.339	\$ 101.066	\$ 1.137.779	\$ 3.039.118
Caso 2: planta de tratamiento de efluentes Río Cuarto						
Forestación	\$ 778.261	\$ 1.440.000	\$ 1.521.663	\$ 378.822	\$ 4.264.700	\$ 5.786.363
Tratamiento terciario	\$ 15.062.130	\$ 60.000	\$ 15.122.130	\$ 801.052	\$ 9.018.064	\$ 24.140.194
Caso 3: Planta de tratamiento de efluentes residencias universitarias						
Agricultura	\$ 8.262	\$ 50.000	\$ 58.262	\$ 5.745	\$ 64.681	\$ 122.943
Tratamiento terciario	\$ 50.200	\$ 1.000	\$ 51.200	\$ 2.700	\$ 30.396	\$ 81.596

Nota: VACO = Valor Actual de los Costos Operativos, VACT = Valor Actual del Costo Total.

En contraste, el caso 3 presenta costos operativos mayores debido a la demanda de insumos (trabajo, semillas, agroquímicos, energía) para realizar adecuadamente el doble cultivo soja-colza. Una comparación del Valor Actual del Costo Total en los casos 1 y 2, nos permite observar que la planta de tratamiento terciario convencional, cuesta en términos relativos, entre 4 y 15 veces más que la instalación de los filtros verdes. En contraste, en el

caso 3, la planta de tratamiento terciario convencional es 50% más económica que la realización del filtro verde sin considerar la venta de los productos comerciales. Para los casos 1 y 2, los resultados muestran una ventaja sustancial de los filtros verdes en relación al tratamiento convencional; en cuanto que para el caso 3, es necesario considerar los valores comerciales de la producción y el valor de la descontaminación.

En la Tabla 4, se muestra la valorización de los beneficios comerciales, por la venta de rollizos (casos 1 y 2) o semillas de soja-colza (caso 3) y además se incluye el valor de recuperación de la tierra a los 30 años. La última columna presenta el valor actual neto (VAN) de cada alternativa. Para la planta de tratamiento terciario convencional, el VAN es directamente el valor actual del costo total (VACT); mientras que para los filtros verdes se incluye el valor actual de los beneficios comerciales y de la tierra.

Si solo consideramos el valor comercial de cada alternativa, el VAN de los filtros verdes es positivo y supera en los tres casos la planta de tratamiento convencional; mostrando que los filtros verdes constituyen una alternativa competitiva, aún sin considerar la valoración económica de la descontaminación. Sin embargo, la viabilidad comercial de los mismos es sensible al costo de oportunidad del capital y al valor de la tierra (ver Tablas 5,7 y 9).

Tabla 4. Beneficios derivados de productos comerciales y valores actuales netos (VAN) de tecnologías verdes y tecnología convencional (Tratamiento Terciario).

TV Tratamiento	VABC	VA-Tierra	VABC + VA-Tierra	VANC
Caso 1: Planta de tratamiento de efluentes Adelia María				
Forestación	\$ 212.186	\$ 3.180	\$ 215.366	\$ 34.348
Tratamiento terciario	-	-	-	\$ -3.039.118
Caso 2: Planta de tratamiento de efluentes Río Cuarto				
Forestación	\$ 7.436.919	\$ 143.103	\$ 7.580.023	\$ 1.793.659
Tratamiento terciario	-	-	-	\$ -24.140.194
Caso 3: Planta de tratamiento de efluentes Residencias Universitarias				
Agricultura	\$ 164.048	\$ 4.969	\$ 169.017	\$ 46.074
Tratamiento terciario	-	-	-	\$ -81.596

Nota: VABC = Valor Actual de Beneficios Comerciales, VA-Tierra = Valor Actual de la Tierra, VANC = Valor Actual Neto Comercial.

En la Tabla 5, se muestra el análisis de sensibilidad al valor de la tierra y la tasa de descuento para el caso 1. Se puede observar que si el valor de la tierra aumenta a \$5000 y la tasa descuento es del 8%, el proyecto se hace inviable comercialmente. También, utilizando simplemente un valor de descuento del 12%, el proyecto sería considerado inviable. Por lo tanto, la sola consideración del valor comercial para estos casos específicos, nos puede conducir a una decisión equivocada por ignorar los beneficios derivados de la depuración de agua.

Tabla 5. Sensibilidad de la viabilidad comercial del filtro verde al valor de la tierra y tasa de descuento en Adelia María.

Valor de la tierra (\$ ha ⁻¹)	VANC _{6%}	VANC _{8%}	VANC _{10%}	VANC _{12%}
2.000	\$ 82.621	\$ 34.348	\$ 1.508	\$ -21.306
5.000	\$ 42.978	\$ -8.882	\$ -43.741	\$ -67.704
15.000	\$ -89.164	\$ -152.982	\$ -194.572	\$ -222.364

Nota : VANC=valor actual neto comercial.

En contraste, cuando se incluye la valoración económica de la depuración del efluente a través de los costos evitados. El resultado es más estable ver detalles en la Tabla 6. De esta manera, para el caso 1, el filtro verde no solo constituye una alternativa viable comercialmente, sino segura desde el punto de vista económico por incluir el valor del servicio público de depuración del efluente tratado.

Tabla 6. Sensibilidad de la viabilidad económica del filtro verde al valor de la tierra y tasa de descuento en Adelia María.

Valor de la tierra (\$ ha ⁻¹)	VAN _{6%}	VAN _{8%}	VAN _{10%}	VAN _{12%}
2.000	\$ 3.375.116	\$ 3.073.466	\$ 2.855.587	\$ 2.694.138
5.000	\$ 3.336.974	\$ 3.031.736	\$ 2.811.838	\$ 2.649.240
15.000	\$ 3.146.260	\$ 2.823.086	\$ 2.593.092	\$ 2.424.750
50.000	\$ 2.764.833	\$ 2.405.788	\$ 2.155.600	\$ 1.975.772

En el caso 2, el análisis de sensibilidad de la viabilidad comercial se muestra algo más estable que en el caso 1, posiblemente debido a las economías de escalas en el manejo del filtro verde (Tabla 7). El filtro verde sería inviable comercialmente a una tasa de descuento del 15%, aun con un valor de la tierra de \$2000 (precio constante). Prácticamente el valor de la tierra tendría que cuadruplicarse para un tasa de descuento del 8%, para hacer inviable comercialmente el proyecto. La estabilidad del resultado es aún mayor cuando se incorpora el valor económico de la depuración (Tabla 8), por lo tanto, el filtro verde se constituye en una alternativa viable comercialmente y económicamente, además muy segura ante cambios del valor de la tierra y costo de oportunidad del capital.

Tabla 7. Sensibilidad de la viabilidad comercial del filtro verde al valor de la tierra y tasa de descuento en Río Cuarto.

Valor de la tierra (\$ ha ⁻¹)	VANC _{6%}	VANC _{8%}	VANC _{10%}	VANC _{12%}	VANC _{15%}
2.000	\$ 3.522.732	\$ 2.093.808	\$ 1.123.002	\$ 445.001	\$ -231.434
4.000	\$ 3.276.390	\$ 1.793.659	\$ 792.563	\$ 97.332	\$ -592.261
20.000	\$ 1.305.657	\$ -607.535	\$ -1.850.947	\$ -2.684.018	\$ -3.478.875
50.000	\$ -2.389.467	\$ -5.109.773	\$ -6.807.528	\$ -7.899.051	\$ -8.891.275

El caso 3, también muestra una viabilidad comercial, aunque relativamente sensible ante cambios en el valor de la tierra o costos de oportunidad del capital. En la Tabla 9, se puede observar que si se triplica el valor de la tierra (probable en tierras sujeta a desarrollo urbano), el filtro verde se torna inviable comercialmente aún para tasa de descuento del 6%. Los resultados obtenidos cuando incluimos la valoración de la depuración del agua (usando el método de costo evitado), arrojan resultados consistentes con los hallados por Ko et al. (2004), donde se muestra que el filtro verde supera hasta en seis veces los beneficios económicos de los tratamientos convencionales.

Además, cuando se incluye el valor de la depuración del agua, se constituye en una alternativa de muy baja sensibilidad a los cambios en el precio de la tierra y al costo de oportunidad del capital. También, los resultados muestran que la inclusión de los beneficios ambientales mejora significativamente la estabilidad de los resultados y da mayor seguridad a los decisores públicos en la asignación de recursos para resolver problemas ambientales. La situación se hace relativamente más estable cuando se incorpora el valor de la depuración del efluente tratado (Tabla 10). Aun así, el filtro verde no sería viable económicamente para un valor de la tierra de \$15.000 y una tasa de descuento de 12% (VAN = \$-7.207).

Tabla 8. Sensibilidad de la viabilidad económica del filtro verde al valor de la tierra y tasa de descuento, Río Cuarto.

Valor de la tierra (\$ ha ⁻¹)	VAN _{6%}	VAN _{8%}	VAN _{10%}	VAN _{12%}	VAN _{15%}
2.000	\$ 29.641.200	\$ 26.204.003	\$ 23.766.576	\$ 21.989.748	\$ 20.120.384
5.000	\$ 29.316.688	\$ 25.798.779	\$ 23.315.918	\$ 21.513.245	\$ 19.624.143
15.000	\$ 28.234.980	\$ 24.448.033	\$ 21.813.724	\$ 19.924.901	\$ 17.970.010
50.000	\$ 24.449.001	\$ 19.720.421	\$ 16.556.045	\$ 14.365.697	\$ 12.180.542

Nota: VAN = valor actual neto económico.

Tabla 9. Sensibilidad de la viabilidad comercial del filtro verde al valor de la tierra y tasa de descuento en Residencias Universitarias.

Valor de la tierra (\$ ha ⁻¹)	VANC _{6%}	VANC _{8%}	VANC _{10%}	VANC _{12%}	VANC _{15%}
2.000	\$ 96.716	\$ 73.093	\$ 56.091	\$ 43.505	\$ 29.995
5.000	\$ 71.939	\$ 46.074	\$ 27.811	\$ 14.507	\$ 448
15.000	\$ -10.650	\$ -43.988	\$ -66.458	\$ -82.156	\$ -98.041
50.000	\$ -299.711	\$ -359.206	\$ -396.400	\$ -420.473	\$ -442.755

Nota: VANC = Valor Actual Neto Comercial.

Tabla 10. Sensibilidad de la viabilidad económica del filtro verde al valor de la tierra y tasa de descuento en las Residencias Universitarias.

Valor de la tierra (\$ ha ⁻¹)	VAN _{6%}	VAN _{8%}	VAN _{10%}	VAN _{12%}	VAN _{15%}
2.000	\$ 184.481	\$ 154.089	\$ 132.144	\$ 115.854	\$ 98.323
5.000	\$ 160.305	\$ 127.670	\$ 104.463	\$ 87.456	\$ 69.376
15.000	\$ 79.716	\$ 39.608	\$ 12.194	\$ -7.207	\$ -27.113
50.000	\$ -202.346	\$ -268.610	\$ -310.748	\$ -338.524	\$ -364.827

Nota: VAN = valor actual neto económico.

4. CONCLUSIONES

La utilización de tecnologías verdes para el aprovechamiento de aguas residuales urbanas tratadas se presenta promisorio a nivel económico y ambiental. Las posibilidades de su utilización se ven reforzadas en aquellas localidades o ciudades donde no se cuenta con otro cuerpo receptor para los vertidos cloacales y exista la posibilidad de acceder a tierras con uso extensivo o bajo valor de mercado de las mismas.

En general, los resultados muestran las ventajas económicas de las tecnologías verdes sobre los sistemas de tratamientos convencionales; específicamente, las tecnologías verdes tienen costos de inversión capital significativamente menor y además proveen beneficios comerciales por las ventas de productos al mercado. Sin embargo, si se ignoran los valores de la depuración del efluente tratado, la viabilidad comercial de los mismos queda condicionada al valor de la tierra y la tasa de descuento.

5. REFERENCIAS

- BECERRA, V. H. et al. **Plan Director ADESUR**. Río Cuarto: Universidad Nacional de Río Cuarto, 1999. 133p.
- BERTONCINI, E. I. Tratamento de efluentes e reúso da água no meio agrícola. **Revista Tecnologia & Inovação Agropecuária**, v. 1, n. 1, p. 152-169, 2008.
- BRANDER, L. M.; FLORAX, R. J. G. M.; VERMAAT, J. E. The empirics of wetland valuation: a comprehensive summary and a meta-analysis of the literature. **Environmental and Resource Economics**, v. 33, n. 2, p. 223-250, 2006. <http://dx.doi.org/10.1007/s10640-005-3104-4>
- CISNEROS, J. M. H. et al. **Estudio y proyecto implantación de un monte forestal comunal bajo riego con efluentes cloacales tratados en la ciudad de Río Cuarto**. Río Cuarto: Universidad Nacional de Río Cuarto; Empresa Municipal de Obras Sanitarias de Río Cuarto, 2003. 49p.
- CONTRERAS, E. **Evaluación social de inversiones públicas: enfoques alternativos y su aplicabilidad para Latinoamérica**. Santiago de Chile: CEPAL, 2004. 102p.
- CRESPI, R.; PLEVICH, O.; THUAR, A.; GROSSO, L.; RODRÍGUEZ, C.; RAMOS, D. et al. Manejo de aguas residuales urbanas. 2005. Disponible en: <http://www.ecopuerto.com/bicentenario/informes/AGUASRESIDUALESURBANAS.pdf>. Acceso en: 10 out. 2013.
- FASCILOLO, G. E.; MECA, M. I.; GABRIEL, E.; MORÁBITO, J. Effects on crops of irrigation with treated municipal wastewater. **Water Science & Technology**, v. 45, n. 1, p. 133-138, 2002.
- KO, J. Y.; DAY, J. W.; LANE, R. R.; DAY, J. N. A comparative evaluation of money-based and energy-based cost-benefit analyses of tertiary municipal wastewater treatment using forested wetlands vs. sand filtration in Louisiana. **Ecological Economics** 49, n.3, p.331-347, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.01.011>
- MATOS, A. T.; EMMERICH, I. N.; BRASIL, M. S. Tratamento por escoamento superficial de águas residuárias da lavagem e despolpa de frutos do cafeiro em rampas cultivadas com azevém. **Engenharia na Agricultura**, v. 13, n. 4, p. 240-246, 2005.

-
- PLEVICH, J. O.; DELGADO, A. R. S.; SAROFF, C.; TARICO, J. C.; CRESPI, R. J.; BAROTTO, O. M. El cultivo de alfalfa utilizando agua de perforación, agua residual urbana y precipitaciones. **Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 12, p. 1353-1358, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012001200013>
- SANTALLA, E.; FONDO ARGENTINO DE CARBONO - FAC. **Estudio de performance ambiental desarrollado para el FAC**. [S.l.]: UNCPBA, 2008. p. 114.
- VARALLO, A. C. T.; SOUZA, J. M. de; REZENDE, S. S. R.; SOUZA, C. F. Avaliação da qualidade sanitária da alface (*Lactuca sativa*, L.) irrigada com água de reúso comparada com amostras comercializadas. **Ambi-Água**, v. 6, n. 2, p. 295-304, 2011. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.201>
- WOODWARD, R. T.; WUI, Y. S. The economic value of wetland services: a meta-analysis. **Ecological Economics**, v. 37, p. 257-270, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8009\(00\)00276-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8009(00)00276-7)