

MODELO DE APTITUD DE SITIOS PARA RIEGO CON AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y EVALUACIÓN MULTI-CRITERIO EN CAFAYATE, SALTA.

M.L. Gatto D'Andrea¹, M.E. Hernández¹, V.I. Liberal², V. Garcés³, G. Salas Barboza¹, J. Volante⁴, L. Seghezzo¹

Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional de Salta (UNSa), Avda. Bolivia 5150, A4408FVY Salta, Argentina. Tel. +54-387-4255516; E-mail: mlauragatto@gmail.com

Recibido 10/09/15, aceptado 14/10/15

RESUMEN: En este trabajo se presenta un modelo preliminar de evaluación de aptitud de sitios para riego con aguas residuales domésticas que integra herramientas de Evaluación Multi-Criterio y Sistemas de Información Geográfica. La metodología fue adaptada a las condiciones y características de Cafayate mediante visitas, entrevistas y encuestas con actores locales y expertos. Se seleccionaron seis limitantes y diez factores y se identificaron 3504 has aptas para la actividad. Las áreas aptas fueron clasificadas en tres categorías de aptitud, presentándose sitios de aptitud alta cercanos a la actual planta de tratamiento de aguas residuales. La herramienta desarrollada permitió integrar los factores que intervienen en la valoración de la aptitud de sitios para el aprovechamiento seguro de las aguas residuales y puede ser modificada para su aplicación en otras regiones y/o con otros objetivos.

Palabras clave: Aguas residuales domésticas, Evaluación Multi-Criterio, Riego, Salta, Sistemas de Información Geográfica.

INTRODUCCIÓN

Se prevé que la población mundial se incremente alrededor de un 65% en los próximos 50 años (Wallace, 2000). El crecimiento poblacional implicará un aumento significativo en la demanda de agua y alimento, pero también una liberación creciente de aguas residuales que requieren de un tratamiento y disposición final adecuados. El aprovechamiento de las aguas residuales domésticas en condiciones seguras puede ser una estrategia para hacer frente a estos desafíos, en particular si son empleadas para fines agrícolas. El riego con aguas residuales (crudas, parcialmente tratadas y tratadas) involucra aproximadamente unas 20 millones de hectáreas, 200 millones de productores y un 10% de consumidores a nivel mundial (Jiménez y Asano, 2008; Raschid-Sally y Jayakody, 2008). Aunque en la actualidad representa menos del 5% de los usos totales de agua, es probable que el uso de aguas residuales se extienda a medida que la escasez de agua se intensifique, especialmente en países de zonas áridas y semiáridas (Hamilton *et al.*, 2007; Scheierling *et al.*, 2010). Adicionalmente, los nuevos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por Naciones Unidas tienen como objetivo aumentar significativamente el porcentaje de reciclaje y reutilización segura de aguas residuales para el año 2030 (SDSN, 2015). Además de favorecer la conservación de los recursos hídricos, el riego de cultivos con aguas residuales puede contribuir a minimizar los impactos ambientales negativos asociados con su descarga en los cursos de agua (Toze, 2006) y a mejorar la fertilidad de los suelos y la productividad de los cultivos (OMS, 2006). Por otra parte, su aplicación al suelo actúa como un sistema de tratamiento complementario, ya que en su matriz son purificadas a través de mecanismos físicos, químicos y biológicos (USEPA, 2006).

¹ CONICET- INENCO

² Profesora Adjunta Facultad de Ingeniería - UNSa

³ Facultad de Ciencias Naturales (UNSa) – INENCO

⁴ INTA – Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

Aunque existen otros sistemas de tratamiento en suelo (por ejemplo, la infiltración rápida para recarga de acuíferos), la irrigación tiene un potencial superior en relación a la remoción de contaminantes de las aguas residuales municipales (WEF, 1990). A pesar de los beneficios de la práctica, la población suele oponerse a que este tipo de actividades “no deseables” se sitúen en sus proximidades (Duong y Saphores, 2015). La capacidad o aptitud de un sitio determinado para el riego con aguas residuales debe tener en cuenta, además de los factores socio-culturales, una serie de criterios ambientales, técnicos, económicos, políticos y legales de cada caso en particular. Se puede decir que a medida que la aptitud de las áreas disminuye, aumentan los riesgos potenciales en el ambiente, la salud pública y los costos asociados, requiriendo de tecnologías y prácticas de manejo complementarias. Estas situaciones crean una gran presión en los tomadores de decisiones involucrados en procesos de localización o emplazamiento de sitios (Chang *et al.*, 2008).

La información sobre la cantidad y calidad de aguas residuales domésticas generadas y una distribución geográfica sobre las posibilidades de su aprovechamiento para riego en zonas periurbanas podría ser una herramienta útil para el diseño de políticas de gestión del agua y protección de la salud pública. La expansión de las actividades de reutilización de aguas residuales debería estar respaldada, entre otras cuestiones, por una evaluación de aptitud de sitios en función de criterios específicos. Por ejemplo, analizando simultáneamente las características del agua tratada, del suelo, de los cultivos y sus necesidades de agua y nutrientes, los usos del suelo, las restricciones ambientales y legales, la accesibilidad, entre otros factores. La integración de técnicas de Evaluación Multi-Criterio (EMC) y Sistemas de Información Geográfica (SIG) conforman una herramienta de gran utilidad para evaluar el grado de idoneidad o aptitud del uso de la tierra (Malczewski, 2000). La EMC permite combinar criterios de diversa índole y sus correspondientes ponderaciones de importancia para una determinada actividad, y los SIG analizan y tratan espacialmente esos criterios obteniendo como resultado mapas de aptitud de sitios (Gómez y Barredo, 2005). Este procedimiento requiere la transformación de los datos en variables expresadas en unidades comparables (Malczewski, 2004). Desde hace varios años, los SIG y la EMC se han utilizado para estudios ambientales de diversa índole, tales como la localización de sistemas de tratamiento de aguas residuales (Gemitzi *et al.*, 2007), de sitios para recarga de acuíferos con aguas residuales (Kallali *et al.*, 2007; Anane *et al.*, 2008; Pedrero *et al.*, 2011), de rellenos sanitarios (Chang *et al.*, 2008), entre otras aplicaciones. También hay antecedentes sobre la temática relacionada con el objetivo de este trabajo (Anane *et al.*, 2012). En general, en muchos de estos estudios se incluyen criterios predefinidos en la bibliografía sin considerar la información proveniente de la interacción con diversos actores locales. La identificación, selección y valoración de estos criterios no deberían adaptarse (exclusivamente) de otras regiones, sino que debe considerarse la información local, por ejemplo, proveniente de diversos actores que tienen una vinculación directa o indirecta con la actividad.

El riego de cultivos con aguas residuales domésticas bajo distintos grados de tratamiento para riego de cultivos es una práctica actual en la provincia de Salta con tendencia de expansión, la cual debe realizarse compatibilizando los intereses productivos y la protección de la salud pública y el medio ambiente. En la provincia de Salta se producen unas 270000 hectáreas bajo riego (23% de las hectáreas cultivadas) (SAGPyA, 2012), administradas por entidades de consorcios de productores que abonan un canon por el servicio. La localidad de Cafayate se localiza en una zona semiárida, donde los cultivos agrícolas consumen elevadas cantidades de agua que provienen tanto de fuentes superficiales como subterráneas. En los últimos años la cantidad de pozos de extracción de agua subterránea se ha incrementado notablemente. Sin embargo, la ausencia de estudios del estado de los acuíferos dificulta efectuar estimaciones sobre la disponibilidad de agua e impide controlar su uso y extracción (Rainer, 2014). En esta localidad se desarrolla actualmente una experiencia de utilización de aguas residuales para riego de cultivos, por lo que la herramienta fue aplicada para su validación y posterior adaptación y aplicación en otras localidades. Por otra parte, debido al notable crecimiento poblacional de Cafayate (acentuado en los últimos años), se encuentra en proyecto una nueva planta de tratamiento de aguas residuales que permitiría incrementar los sitios potenciales de aprovechamiento de este recurso.

El objetivo de este trabajo es identificar y clasificar las áreas con aptitud para la localización de sitios para riego con aguas residuales en Cafayate, integrando herramientas de Evaluación Multi-Criterio y Sistemas de Información Geográfica e incorporando información proveniente de actores locales y

expertos. El presente estudio muestra los resultados preliminares obtenidos fundamentalmente a partir de información oficial, consulta bibliográfica y entrevistas con actores locales y expertos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

El departamento Cafayate se encuentra situado en la zona central de los Valles Calchaquíes de la provincia de Salta, a unos 1680 m.s.n.m. (**Figura 1**). Hacia fines del siglo XIX, Cafayate contaba con una población de sólo 5000 habitantes. Según datos del último Censo Nacional, la localidad de Cafayate posee 14850 habitantes (INDEC, 2010). Actualmente el 90% de la población se concentra en este centro urbano, localidad más importante y cabecera del departamento, y el 10% restante se distribuye en el ámbito rural, en los parajes de Las Conchas, La Punilla, Lorohuasi, Chuscha, Yacochuya, El Divisadero y Tolombón.

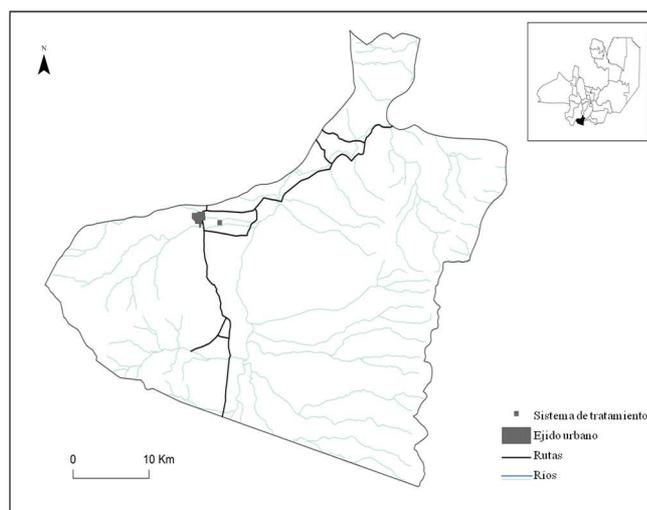


Figura 1. Ubicación del departamento Cafayate, Salta.

La prestación de los servicios de agua potable y saneamiento en la localidad de Cafayate es brindada por CoSAySa (Compañía Salteña de Agua y Saneamiento S.A.), una compañía de propiedad estatal. La cobertura de agua potable y saneamiento es del 90.9% y 78.4% respectivamente (INDEC, 2010). Según datos provistos por la compañía, existen unas 4500 conexiones activas de agua potable, de las cuales el 90% dispone también de conexiones a la red cloacal. La procedencia de las aguas residuales incluye usuarios domiciliarios, actividades comerciales (restaurantes, almacenes, hoteles) y cuatro establecimientos bodegueros de la zona que vuelcan sus efluentes al sistema colector. Este sistema deriva los efluentes para su tratamiento hacia una laguna de estabilización. La dotación de agua potable ronda los 600 litros/habitante/día⁵. El elevado consumo de agua potable estaría asociado con prácticas culturales y ancestrales de riego de viñas en los patios de las viviendas y al lavado de veredas debido a la acumulación permanente de material transportado por los vientos de la zona. El clima se caracteriza por un moderado grado de aridez, consecuencia de las deficientes precipitaciones (200 mm anuales) y la gran amplitud térmica. Las precipitaciones coinciden con el período de altas temperaturas (noviembre a marzo), donde se produce el 80-85% del total anual, bajo la influencia del centro ciclónico estival denominado baja térmica (Bianchi y Yáñez, 1992). Las escasas precipitaciones mensuales no alcanzan a cubrir las necesidades hídricas de la zona, por lo que existe déficit hídrico en todos los meses del año. Los suelos son de escaso desarrollo, predominantemente de textura gruesa (franco arenosos/arenosos), pudiendo tener un drenaje excesivo (Valencia *et al.*, 1970). El valle de Cafayate-Tolombón conforma unidades hidrogeológicas complejas que constituyen importantes reservorios de agua subterránea (Rocha *et al.*, 2011).

La localidad de Cafayate sustenta su economía en la actividad agropecuaria, requiriendo exclusivamente del aporte de agua mediante riego. El cultivo de vid abarca la mayor superficie

⁵ Marcelo Ramos. Jefe Distrito Valles Calchaquíes. Com. Pers.

cultivada de la zona (60% aproximadamente), aunque también se produce pimiento, cereales, forrajeras y hortalizas como cebolla y ajo. El abastecimiento de agua para uso urbano y agropecuario se realiza a partir de recursos superficiales y subterráneos. Estas últimas fuentes de captación se empezaron a explotar en las últimas décadas debido a la escasez de agua y la insuficiencia para satisfacer su creciente demanda, especialmente para usos agrícolas. Las captaciones subterráneas se encuentran principalmente bajo dominio de establecimientos viñateros y bodegueros. Se puede decir que el agua subterránea ha posibilitado el crecimiento de la vitivinicultura, del turismo y del sector inmobiliario (Rainer, 2014), aunque no hay información certera sobre el incremento de la superficie cultivada bajo este sistema de riego. En contraste, los usuarios consorciados del sistema de riego no sufren modificaciones desde la creación de dicho consorcio (Ley 7017/98, Código de Aguas de la provincia de Salta). Es decir, las concesiones son históricas y no se admite que nuevos usuarios se incorporen al sistema⁶. Existen actualmente unos 467 usuarios que irrigan una cantidad de 3600 ha, a partir de tomas de agua del río (86%) y pozos perforados (14%) (DGE, 2012).

Disponibilidad de aguas residuales domésticas

La existencia de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas en las proximidades de las áreas de cultivo es un requisito previo para evaluar el aprovechamiento de este recurso. El área factible de ser regada es una función directa de dos variables adicionales: (1) el caudal disponible de la planta de tratamiento de aguas residuales; y (2) los requerimientos de agua del cultivo seleccionado. El caudal fue estimado en estudios previos utilizando las siguientes variables: (a) número de cuentas de alcantarillado (una cuenta es básicamente un hogar); (b) número de habitantes por hogar; y (c) consumo de agua por persona (Gatto *et al.*, 2014). La planta de tratamiento de aguas residuales fue localizada y geo-referenciada mediante un dispositivo GPS Garmin durante las visitas de campo. La información referente a este sistema de tratamiento se obtuvo a partir de datos brindados por personal de la compañía (CoSAySa), y se complementó con información de personal de la sede del Distrito Valles Calchaquíes. Según los datos facilitados, las pérdidas de agua en el sistema de distribución rondan el 35%. El coeficiente de retorno se asumió en 0.8 (80% del agua consumida es recolectada como agua residual). El caudal diario de aguas residuales se estimó en 4600 m³/día. Se determinó que las aguas residuales tratadas no son aptas para el riego irrestricto de cultivos debido a su deficiente calidad microbiológica (Gatto *et al.*, 2014).

Modelo de evaluación de aptitud de sitios

Para la construcción del modelo se empleó una EMC de objetivo simple integrada en un SIG, que incluyó los siguientes pasos: (1) selección de criterios, rangos de aptitud e identificación de una estructura jerárquica; (2) identificación de limitantes; (3) ponderación de factores; (4) normalización de factores; (5) obtención de mapas de limitantes; y (6) clasificación de los sitios con mejor aptitud.

1. Selección de criterios, factores y limitantes

Un criterio es la base para la elección entre alternativas que pueden ser medidas y evaluadas, pudiéndose distinguir dos tipos de criterios: factores y limitantes (Eastman, 2012). Los factores aumentan o disminuyen la aptitud de una alternativa específica para la actividad, por lo tanto suelen medirse en una escala continua. Las limitantes restringen la disponibilidad de algunas alternativas en función de la actividad evaluada y se expresan en forma booleana (binaria), donde las áreas excluidas poseen el valor 0 y al resto del área le corresponde el valor 1.

En la **Figura 2** se detalla la estructura jerárquica de los criterios empleados para la construcción del modelo de toma de decisión (Crites, 1977; USEPA, 1984; 2004; 2006; WEF, 1990). Los factores y limitantes fueron seleccionados en función de su importancia, su capacidad para indicar aptitud, restricciones o limitaciones para el desarrollo de la práctica y su simplicidad para ser medidos y mapeados con la información disponible (Bell y Morse, 2008; Bossel, 1999; Kallali *et al.*, 2007). Los criterios de evaluación consistieron en 10 factores y 6 limitantes. Los factores fueron establecidos dentro de cinco grupos o clases: i) legal, ii) sanitario, iii) económico, iv) técnico, y v) ambiental. A continuación se presenta una justificación detallada de esta selección.

⁶ Eduardo Acosta. Administrador del Consorcio de riego. Com.pers.

Legal

Ordenamiento Territorial: Este criterio de naturaleza legal está vinculado al uso de la tierra. Incluye zonas destinadas a la producción agrícola y bosques nativos organizados en tres categorías de conservación definidas en el marco de la Ley Forestal (Ley Nacional N° 26.331). Las clases correspondientes son: (1) Blanco (tierras actuales bajo cultivo); (2) Verde (bosques con bajo valor de conservación, Categoría III); (3) Amarillo (bosques con medio valor de conservación, Categoría II); y (4) Rojo (bosques con alto valor de conservación, Categoría I).

Sanitario

Distancia a áreas urbanas: Las distancias o zonas de amortiguamiento alrededor de los sitios de uso de aguas residuales tienen como objetivo controlar el acceso del público, evitar la exposición humana a los patógenos y contaminantes, y mantener las condiciones estéticas (USEPA, 1984). La distancia más adecuada será aquella que facilite las prácticas de riego con aguas residuales, protegiendo la salud de la población de la contaminación, minimizando los impactos ambientales y manteniendo la eficiencia de los usos adyacentes de la tierra (USEPA, 2004). Diversos estudios sobre la aplicación de aguas residuales para riego o para recarga de acuíferos han adoptado una distancia de seguridad de 200 metros de zonas residenciales (Anane *et al.*, 2008; Anane *et al.*, 2012; Kalalli *et al.*, 2007; Pedrero *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2012).

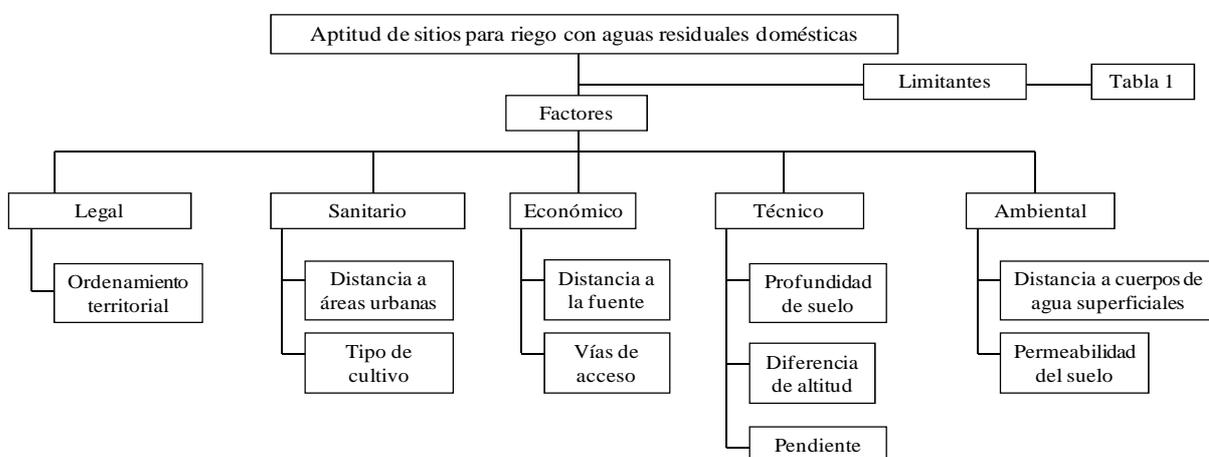


Figura 2. Estructura jerárquica del modelo de evaluación de aptitud de sitios.

Tipo de cultivo: El riesgo de contaminación humana es menor cuando el riego se aplica en cultivos que no están en contacto directo con las aguas residuales y/o que no se ingieren en estado crudo (OMS, 2006). Debido a la calidad deficiente de las aguas residuales en el área de estudio, para su aprovechamiento seguro se recomienda el riego restringido de cultivos. La vid es el cultivo principal en Cafayate, con una buena rentabilidad y que podría ser regado con las aguas tratadas. Sin embargo, se detectó que en muchos casos la vid se combina conjuntamente con cultivos de pimienta en el mismo lote. Por otra parte, las hortalizas generalmente consisten en pequeños lotes de cultivo, prácticamente irrelevantes en la escala considerada. Por lo tanto, este criterio no fue digitalizado y considerado en el análisis espacial, pero deberá tenerse en cuenta en estudios más detallados.

Económico

Distancia a fuentes de aguas residuales: Se refiere a la proximidad geográfica del potencial sitio de reutilización a la planta de tratamiento de aguas residuales. La distancia refleja la longitud necesaria de la tubería o canal de transporte, y por lo tanto los costos necesarios para trasladar las aguas residuales desde su lugar de origen al sitio de destino. Por lo tanto, cada kilómetro de distancia incrementará los costos (Alkhamisi y Ahmend, 2014). Por ejemplo, la USEPA (2006) considera que la distancia del sistema de tratamiento de la zona de aplicación potencial no debe exceder los 8 km, este valor ha sido adoptado como umbral en estudios anteriores (Kalalli *et al.*, 2007; Silva *et al.*, 2012).

Vías de acceso: Se refiere a la infraestructura de caminos y rutas. Los agricultores deberían tener una buena accesibilidad a las parcelas agrícolas para facilitar el transporte y la comercialización de sus productos.

Técnico

Diferencia de altitud: Consiste en la diferencia de elevación entre la planta de tratamiento y el sitio de aplicación potencial de las aguas residuales. Cuanto la zona de cultivo se encuentre a mayor nivel que la planta de tratamiento, existirán dificultades para transportar el agua, exigiendo su bombeo. El transporte de las aguas residuales desde las plantas de tratamiento implica leves riesgos técnicos relacionados con, por ejemplo, fallas en las estaciones de bombeo (Alkhamisi y Ahmed, 2014). Estudios similares adoptaron 15 metros como valor máximo de diferencia de altitud (Kallali *et al.*, 2007; Pedrero *et al.*, 2011), un valor que sugiere la USEPA (2006).

Pendiente: Aunque la pendiente está íntimamente ligada con el método de riego, no se recomienda una pendiente excesiva, ya que aumenta la escorrentía y la erosión, afecta el crecimiento de los cultivos y podría elevar los costos de producción (WEF, 1990). La WEF (1990) y la USEPA (2006) recomiendan pendientes inferiores al 20% para la agricultura. Diversos estudios de selección de sitios para aplicación de aguas residuales a cultivos o recarga de acuíferos adoptaron pendientes inferiores al 12% (Anane *et al.*, 2007; Kallali *et al.*, 2007; Pedrero *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2012); y en otros casos al 15% (Anane *et al.* 2008; Anane *et al.*, 2012).

Profundidad de suelos: La profundidad del suelo proporciona un soporte para el desarrollo de las raíces e influye en la cantidad de agua disponible para los cultivos (Asawa, 2008). Por otra parte, la profundidad del suelo facilita las condiciones de depuración donde la matriz actúa como un sistema de post-tratamiento de las aguas residuales. Anane *et al.* (2008) adoptó un valor mínimo de 25 cm de profundidad del suelo para riego de cultivos con aguas residuales.

Ambiental

El uso de aguas residuales para riego puede ser una fuente de contaminación difusa debido a su concentración de contaminantes (principalmente nitratos) (OMS, 2006). Las aguas residuales podrían alcanzar los acuíferos por infiltración a través de la zona no saturada o los cuerpos de aguas superficiales, alterando su calidad.

Distancia a cuerpos de agua superficiales: Las zonas de amortiguamiento tienen por objeto proteger la calidad de los cuerpos naturales de agua (ríos, arroyos y otros). La USEPA (2006) sugiere una distancia de seguridad hacia los cuerpos de agua de 50 metros.

Textura del suelo: La textura del suelo (proporción de arena, limo y arcilla) determina las características de drenaje/lixiviación, retención de nutrientes, remoción de microorganismos y la capacidad de retención de agua de un sitio determinado (Poole *et al.*, 2004). Los suelos de textura fina poseen un drenaje deficiente y retienen gran porcentaje de agua durante periodos prolongados. Por el contrario, los suelos de textura gruesa pueden infiltrar grandes cantidades de agua, lo que significaría un riesgo de infiltración y contaminación de las aguas subterráneas. El contenido de material fino en los suelos es importante al considerar aguas residuales ya que la remoción de virus y bacterias, como así también de metales pesados, es más eficiente debido a los procesos de adsorción (USEPA, 2006). Los suelos más adecuados para recuperación y drenaje de las aguas residuales serán aquellos de texturas intermedias, brindando una buena capacidad de almacenamiento de agua, nutrientes y retención de microorganismos (Ayers y Westcot, 1976).

2. Identificación de limitantes

Los criterios limitantes (o restricciones) fueron establecidos según la lógica booleana. Debido a que aún no existe legislación específica que regule las condiciones para el riego con aguas residuales, los valores de exclusión fueron cuidadosamente establecidos. Se asignó un valor umbral de aptitud en base a una extensa revisión de guías internacionales, informes técnicos y artículos científicos. Posteriormente, para adaptar y redefinir estos valores se realizaron entrevistas semi-estructuradas con actores locales y expertos agrícolas del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y la Universidad Nacional de Salta (UNSa). Las áreas que se encuentran fuera de los umbrales se consideraron no aptas para el riego con aguas residuales en el área de estudio. El mapa de restricciones se obtuvo combinando todos los mapas booleanos mediante un operador de intersección.

Las limitantes identificadas en el área de estudio fueron las siguientes: Ordenamiento Territorial; Pendiente; Profundidad de suelos; Distancia a áreas urbanas; Diferencia de altitud; Distancia a cuerpos de agua superficiales (**Tabla 1**). Cabe destacar que no se consideró como limitante la distancia a la fuente de aguas residuales, ya que los expertos y productores entrevistados afirman que se trata de una cuestión económica que merece de un estudio más detallado, sobre todo en zonas áridas donde en algunos casos el transporte de agua abarca grandes distancias. Por ejemplo, en Asia, el agua residual tratada es transportada desde la ciudad de Kuwait hasta Al-Abdali unos 120 km para ser utilizada en riego de cultivos agrícolas (Alkamisi y Ahmed, 2014). El criterio vías de acceso no se consideró una limitante, pero sí un factor que influye positivamente al facilitar el acceso a las zonas de cultivo.

A continuación se justifican las limitantes seleccionadas. Para la limitante Ordenamiento Territorial, debido a requisitos legales, las áreas bajo las categorías II (medio valor de conservación) y I (alto valor de conservación) del mapa de Ordenamiento Territorial de la provincia de Salta fueron excluidas de los potenciales sitios de riego con aguas residuales. En el caso de la Pendiente, se determinó que el método de riego factible será superficial, dadas las condiciones actuales de operación y funcionamiento de la laguna de estabilización. Un sistema de riego por goteo no sería viable, ya que se tapan las boquillas de los dispositivos por la elevada carga de sólidos en suspensión de las aguas residuales. Se prevé además que esta actividad beneficiará principalmente a potenciales pequeños o medianos productores, quienes no tienen capacidad suficiente de inversión en infraestructura para sistemas de riego por goteo. Según lo expresado, la pendiente podría adoptar como máximo un valor de 5%. En cuanto a la Profundidad del suelo, se determinó que para el desarrollo adecuado de los cultivos, en especial de la vid, se recomiendan suelos con profundidades mayores a 30 cm. En relación a la Distancia a las áreas urbanas, los pobladores y vecinos entrevistados en los alrededores del actual sistema de tratamiento de efluentes no manifestaron molestias por posibles efectos adversos, ya que el mismo se encuentra aislado del ejido urbano y en un predio cubierto por abundante vegetación. De todas maneras, por cuestiones de seguridad se adoptó una distancia de 200 metros de las zonas urbanas residenciales. Adicionalmente, esta distancia favorece que la práctica se realice alejada de los pozos de agua potable que se localizan en general dentro del ejido urbano. Para la limitante Distancia a los cuerpos de agua superficiales, por motivos de seguridad se adoptó para este estudio la recomendación de la USEPA (2004), que establece una distancia mínima de separación de 50 metros desde el sitio de riego hacia los cuerpos de agua naturales.

Limitante	Valor o categoría limitante
Ordenamiento Territorial	Categorías I (roja) y II (amarilla)
Pendiente	> 5%
Profundidad de suelo	Suelos someros (profundidad <30 cm)
Distancia a áreas urbanas	< 200 m
Diferencia de altitud	Sitios emplazados a cotas mayores al sistema de tratamiento
Distancia a cuerpos de agua superficiales	<50 m de cursos de agua

Tabla 1: Limitantes del modelo de evaluación de aptitud de sitios para riego con aguas residuales.

3. Ponderación

Para determinar el grado de relevancia de los criterios en la adecuación de un área determinada para el riego con aguas residuales se asignó un peso a cada factor. El método de EMC utilizado fue el método SMART (*Simple Multiple Attribute Rating Technique*) (Edwards, 1977; Edwards and Newman, 1982). SMART es un método de decisión Multi-Criterio basado en la Teoría del Valor de Atributos Múltiples (MAUT, en inglés) (Keeney y Raiffa, 1976) y ampliamente aplicado en la toma de decisiones (Belton y Stewart, 2001; Mustajoki *et al.*, 2005). La asignación de preferencia de los valores estuvo basada en la revisión bibliográfica. La ponderación expresa el grado de relevancia o preferencia de un factor respecto a los otros (**Tabla 2**).

Criterios	<i>p</i>	Sub-criterios (factores)	<i>p</i>	Ponderación final
Legal	0.20	Ordenamiento Territorial	1	0.20
Socio-cultural	0.20	Distancia a áreas urbanas	0.5	0.10
		Tipo de cultivo	0.5	0.10
Económico	0.15	Distancia a la fuente	0.7	0.105

Técnico	0.20	Vías de acceso	0.30	0.045
		Pendiente	0.50	0.10
		Profundidad de suelo	0.25	0.05
Ambiental	0.25	Diferencia de altitud	0.25	0.05
		Distancia a cursos de agua superficiales	0.50	0.125
		Textura del suelo	0.50	0.125

Tabla 2: Ponderaciones de criterios y sub-criterios (factores).

4. Normalización de factores

Los factores no son homogéneos entre sí, ya que son de tipo cualitativos y cuantitativos, continuos y discretos, y tienen distintas escalas de medición. La combinación de los factores debe hacerse sobre escalas comparables, por lo tanto, fue necesario estandarizarlos. En el caso de los factores continuos, como la pendiente y las distancias (por ejemplo, a la planta de tratamiento), se aplicó una normalización con el comando FUZZY (función de pertenencia borrosa) del software IDRISI. Mediante este ajuste, los valores de los píxeles de las capas ráster originales se transformaron a una escala de aptitud entre 0 (menos adecuada) y 255 (más adecuada), mediante una función sigmoidea o lineal (incremental o decreciente). Por ejemplo, en el caso de la pendiente, el valor de adecuación disminuye progresivamente hasta alcanzar el 5% de pendiente, otorgando el valor mínimo de adecuación (0) a todos los píxeles que se encontraran por encima de ese porcentaje.

Para los factores discretos (Profundidad de suelo, Textura de suelo y Ordenamiento Territorial), las clases se agruparon según su capacidad para riego con aguas residuales tratadas. Luego se asignaron pesos a cada clase a través del método SMART. Finalmente, los pesos obtenidos se extendieron de forma lineal entre 0 y 255. En la **Tabla 3** se presentan los pesos correspondientes a cada clase.

Ordenamiento Territorial		Profundidad del suelo (cm)		Textura del suelo	
Clases	p	Clases	p	Clases	p
Áreas agrícolas actuales	0.65	>100	0.48	Areno-franca	0.65
Cat. III	0.35	80-100	0.38	Arenosa	0.25
Cat. I y Cat. II	E	30-80	0.14	Areno-gravilosa	0.1
		<30	E		

Tabla 3. Sub-criterios discretos y ponderaciones según su importancia para riego con aguas residuales. E: excluida.

5. Obtención del Valor de Decisión Compuesto (VDC)

Una vez determinadas las puntuaciones de los pesos y los criterios, el mapa final de aptitud se obtuvo mediante un Valor de Decisión Compuesto (R_i) para cada píxel (i), a través del método Combinación Lineal Ponderada (*Weighted Linear Combination*). El valor de decisión compuesto se obtiene de la siguiente manera:

$$R_i = \sum_k^n w_k r_{ik}$$

donde w_k corresponde al valor de ponderación de los criterios; r_{ik} es el valor normalizado del píxel i en el mapa del factor k , y n es la cantidad total de criterios. El valor R_i varía entre 0 y 255, donde 0 es el valor menos adecuado para el riego de aguas residuales y 255 es el valor más adecuado. Finalmente, luego de obtener los mapas del VDC, se realizó una clasificación de los sitios en tres niveles de aptitud para riego con aguas residuales.

Digitalización

Los mapas fueron digitalizados empleando el software IDRISI Selva 17.0. Las variables fueron representadas en capas temáticas con formato ráster. La información de las capas temáticas fue adquirida de fuentes oficiales y datos geo-referenciados. El mapa de Ordenamiento Territorial se obtuvo del Ministerio de Medio Ambiente y Producción Sustentable del gobierno de la provincia de Salta. La capa de pendiente fue construida utilizando una capa de curvas de nivel proporcionada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) (1: 100.000). Los datos espaciales de suelos se obtuvieron del INTA (1: 500.000); las áreas residenciales, rutas y cuerpos de agua naturales de la base de datos del

IGN (disponible en <http://www.ign.gob.ar/>). Las áreas buffer o de amortiguamiento fueron calculadas con las respectivas capas mediante un algoritmo de distancia a partir del elemento correspondiente. La distancia y elevación de la planta de tratamiento de agua residual se obtuvo mediante visita e identificación de su ubicación con un dispositivo GPS Garmin. Las coordenadas fueron convertidas a una capa de puntos. La diferencia de altitud fue calculada restando el valor de la cota de la planta de tratamiento a partir del mapa de elevación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Identificación de áreas aptas

En la **Figura 3** se muestran los mapas obtenidos para cada una de las limitantes seleccionadas. El área total disponible para riego con las aguas residuales, considerando las limitantes identificadas, es de 3504 hectáreas, lo que representa un 2.5 % del total del área de Cafayate (**Figura 4**). Los criterios más restrictivos fueron la Diferencia de altitud, el Ordenamiento Territorial y la Pendiente, que representan sólo el 13.6%, 15.4% y 16.7% del total del área, respectivamente (**Tabla 4**). La Distancia a áreas urbanas y a los cursos de agua superficiales fueron los criterios menos restrictivos (99.7% y 95.8%). Sin embargo, las áreas presentan importantes diferencias en su aptitud para riego con aguas residuales, algunos de los sitios se encuentran bastante alejados de la fuente (a más de 15 km).

Limitantes	Área (ha)	Área total (%)
Ordenamiento Territorial	21661	15.4
Pendiente	23509	16.7
Profundidad de suelo	59206	42.1
Distancia a áreas urbanas	140169	99.7
Diferencia de altitud	19138	13.6
Distancia a cursos de agua superficiales	134710	95.8
Total	3504	2.5

Tabla 4. Áreas aptas obtenidas para las limitantes.

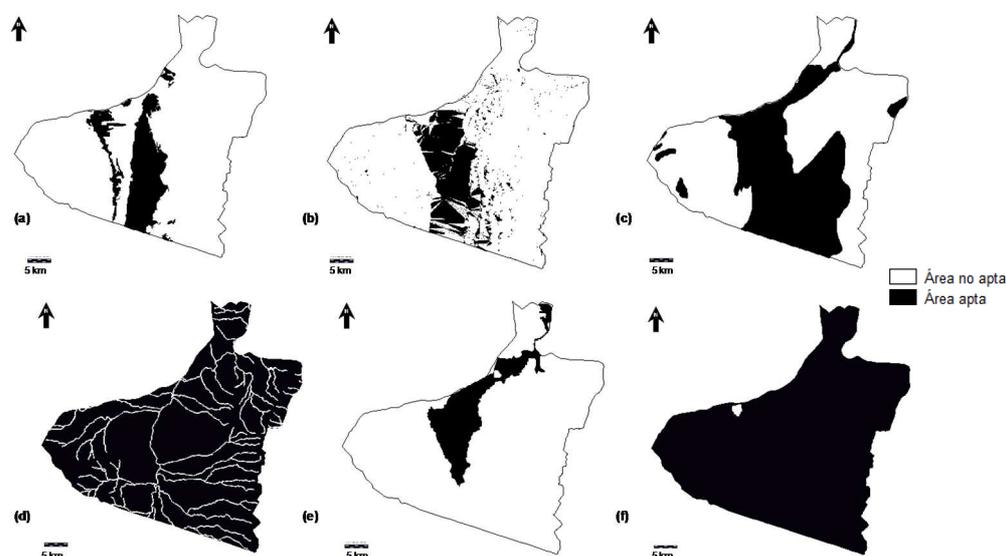


Figura 3. Área apta para riego con aguas residuales tratadas de acuerdo a: (a) Ordenamiento Territorial, (b) Pendiente, (c) Profundidad de suelo, (d) Distancia a cursos de agua superficiales, (e) Diferencia de altitud, (f) Distancia a áreas urbanas (en color negro).

Clasificación de aptitud de áreas

El valor de decisión compuesto (R_i) utilizado para hacer un “ranking” o clasificación de aptitud de las 3504 hectáreas varía de 127 a 236 (**Figura 5**). Se diferenciaron tres clases de aptitud de sitios para riego con aguas residuales: Aptitud baja (rango 127-163), con 324 hectáreas, Aptitud media (rango 163-199), con 2192 hectáreas, y Aptitud alta (rango 199-236), con 988 hectáreas. El área obtenida excede ampliamente la superficie factible de ser irrigada con el actual caudal de la planta de

tratamiento de aguas residuales. A partir del caudal actual, el método de riego propuesto y la posibilidad de almacenamiento de las aguas residuales tratadas, se estima que podrían irrigarse alrededor de unas 150 hectáreas de vid. Dentro del área obtenida (apta), estas hectáreas deberían ser asignadas, en la medida que sea factible, a los sitios de aptitud alta.

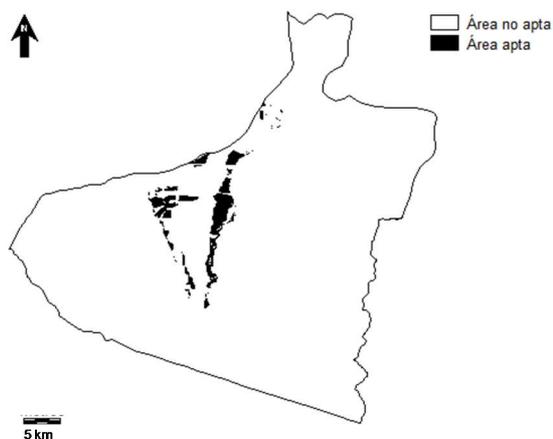


Figura 4. Área apta para riego con aguas residuales domésticas obtenida por la combinación de las limitantes.

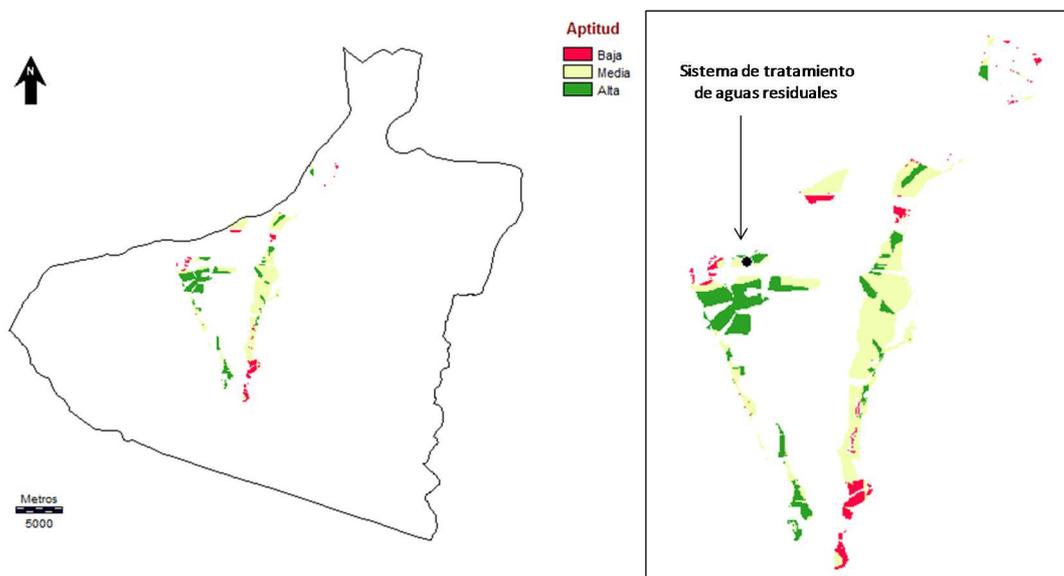


Figura 5. Clasificación de aptitud de sitios para riego con aguas residuales domésticas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se desarrolló un modelo que integra herramientas de EMC con un SIG para identificar sitios potenciales de riego con aguas residuales domésticas en Cafayate, Salta. Los criterios definidos en el modelo estuvieron basados en una revisión bibliográfica, consultas con expertos y entrevistas a actores locales. Se definieron 6 limitantes y 10 factores que fueron agrupados bajo las categorías legal, sanitaria, económica, técnica y ambiental. La Diferencia de altitud, el Ordenamiento Territorial y la Pendiente resultaron los criterios más restrictivos, mientras que la Distancia a áreas urbanas y a cursos superficiales fueron los menos restrictivos, brindando una mayor superficie apta para el desarrollo de la práctica. Se detectó que una extensa área, que cubre unas 3504 hectáreas, sería adecuada para riego con aguas residuales domésticas. Esta área excede la superficie que sería factible de irrigar con el volumen actual de aguas residuales producidas. La elección concreta de los sitios potenciales de riego a partir de esta fuente involucra cuestiones institucionales, socio-culturales y políticas que no forman parte del objetivo del presente estudio. Sin embargo, se presentan sitios muy favorables para la práctica en las cercanías de la actual planta de tratamiento de aguas residuales domésticas.

Esta herramienta puede ser de gran utilidad para la toma de decisiones en la gestión integrada de los recursos hídricos en nuestra región. El aprovechamiento de las aguas residuales (tratadas) puede abordar diferentes estrategias y problemáticas: el aprovechamiento de nutrientes, la mitigación de los efectos de su vertido a cuerpos de agua, como sistema post-tratamiento en suelos, la conservación de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, entre otros. En la zona de estudio este método puede ser considerado para evaluar la potencialidad de utilización del caudal de aguas tratadas provenientes de la planta de tratamiento que se encuentra en proyecto. La herramienta puede ser extrapolable a otras regiones considerando las particularidades de cada caso. Este estudio podría complementarse incluyendo otros datos como vulnerabilidad de acuíferos, tenencia de la tierra e infraestructura de riego. Desafortunadamente, esta información no fue incluida porque no se encuentra disponible o es difícil de adquirir. Este estudio también podría complementarse con una Evaluación Multi-Objetivo donde se incluya por ejemplo el riego de forestaciones, que involucra otros criterios y valoraciones. Se sugiere profundizar los resultados obtenidos contemplando la participación de actores y expertos en la ponderación de criterios y sub-criterios mediante talleres siguiendo la metodología Delphi. Se recomienda efectuar además un análisis de sensibilidad, para evaluar el grado de influencia de los distintos criterios y las ponderaciones asignadas en el resultado final. Finalmente, se destaca que el tratamiento y la recuperación de las aguas residuales domésticas deberían recibir más atención por parte de las instituciones vinculadas al sector de agua y saneamiento para promover una gestión integral y sustentable de los recursos hídricos. El conocimiento científico es fundamental para apoyar las políticas relativas a la gestión y control de las aguas residuales. La comercialización y la aceptación de cultivos regados con estas aguas pueden estar influenciadas por factores como el desconocimiento, la percepción de riesgos sanitarios, la falta de confianza en las autoridades, entre otros. La mejora y optimización de los servicios de saneamiento es fundamental para impulsar y formalizar el uso de las aguas residuales domésticas en condiciones seguras.

REFERENCIAS

- Alkhamisi S.A. y Ahmed M. (2014). Opportunities and Challenges of Using Treated Wastewater in Agriculture (eds) in: Environmental Cost and Face of Agriculture in the Gulf Cooperation Council Countries: Fostering Agriculture in the Context of Climate Change. Gulf Research Centre Cambridge.
- Anane M., Bouzirri L., Limam A. y Jellali S. (2012). Ranking suitable sites for irrigation with reclaimed water in the Nabeul-Hammamet region (Tunisia) using GIS and AHP-multicriteria decision analysis. *Resour Conserv Recycl* 65: 36-46.
- Anane M., Kallali H. y Jellali S. (2008). Ranking suitable sites for Soil Aquifer Treatment in Jerba Island (Tunisia) using remote sensing, GIS and AHP-multicriteria decision analysis. *Int. J. Water* 4, 121-135.
- Asawa G.L. (2008). Irrigation and water resources engineering. New Age International Publisher.
- Ayers R.S. y Westcot D.W. (1985). Water quality for agriculture. *Irrig. Drain.* FAO, Roma, pp. 174.
- Bell B. y Morse S. (2008). Sustainability Indicators: measuring the immeasurable? London: Earthscan Publications Ltd. 2ª Ed
- Belton V. (1986). A comparison of the Analytic Hierarchy Process and a Simple Multi-Attribute Value Function. *European Journal of Operational Research* 26(1):7-21.
- Belton V. y Stewart T.J. (2001). Multiple criteria decision analysis: An integrated approach. Kluwer Academic, Boston.
- Bianchi A.R. y Yáñez, C.E. (1992). Las precipitaciones en el Noroeste Argentino, 2da Ed. INTA, EEA. Salta.
- Bossel H. (1999). Indicators for sustainable development: theory, method, applications. A report to the Balaton Group. International Institute for Sustainable Development (IISD). Winnipeg, Canada.
- Chang N.B., Parvathinathan G. y Breeden J.B. (2008). Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region. *Journal of Environmental Management* 87 (1), 139–153.
- Crites R. (1977). Process Design Manual for Land Treatment of Municipal Wastewater. USEPA, Environmental Research Information Center and Technology Transfer.
- DGE (Dirección General de Estadísticas) (2012). Anuario Estadístico. Año 2012 – avance 2013. Provincia de Salta.
- Duong K. y Saphores, J. (2015). Obstacles to wastewater reuse: an Overview. *WIREs Water* 2:199-214
- Eastman J.R. (2012). IDRISI Selva. Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes. Clark Labs for Cartographic Technology and Geographic Analysis. Clark University.
- Edwards W. (1977). How to use multiattribute utility measurement for social decision making. *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics* 7:326-340.
- Edwards W., Newman J.R. (1982). Multattribute evaluation. Sage, Beverly Hills (CA) and London.
- Gatto D' Andrea M.L., Garcés V., Salas Barboza, A.G.J., Liberal V.I., Rodríguez Álvarez S. y Seghezzi L. (2014). Reúso de aguas residuales domésticas en la actividad agropecuaria: el caso de Cafayate, Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 18, 9 - 18. ISSN 0329-5184.
- Gemitzi A., Tsihrintzis V., Christouc O. y Petalas C. (2007). Use of GIS in siting stabilization pond facilities for domestic wastewater treatment. *Journal of Environmental Management* 82:155–66.
- Gómez M. y Barredo J.L. (2005). Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio, 2nd edition, RA-MA edition.

- Hamilton A.J., Stagnitti F., Xiong X., Kreidl S.L., Benke K.K. y Maher P. (2007). Wastewater irrigation: the state of play. *Vadose Zone J* 6 (4): 823-840.
- INDEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos) (2010). Datos estadísticos disponibles en: <http://www.indec.com.ar>
- Jiménez B. y Asano T. (2008). Water Reuse: an international survey of current practice, issues and needs.-Scientific and Technical report No.20. IWA Publishing, Londres, Inglaterra.
- Kallali H., Anane M., Jellali S. y Tarhouni J.N. (2007). GIS-based multi-criteria analysis for potential wastewater aquifer recharge
- Keeney R. y Raiffa H. (1976). *Decisions with multiple objectives: Preference and value trade offs*. Wiley, New York.
- Malczewski J. (2000). On the use of weighted linear combination method in raster GIS: common and best practice approaches. *Transactions in GIS* 4(1):5-22.
- Malczewski J. (2004). GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Progress in Planning* 62:3-65.
- Mustajoki J., Hämäläinen R.P. y Salo A. (2005). Decision support by interval SMART/SWING—Incorporating imprecision in the SMART and SWING methods. *Decision Sciences* 36(2):317-339.
- OMS (Organización Mundial de la Salud) (2006). Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume II. Wastewater use in agriculture. Ginebra, Suiza.
- Pedrero F., Albuquerque A., Marecos do Monte, H., Cavaleiro V. y Alarcón J.J. (2011). Application of GIS-based multi-criteria analysis for site selection of aquifer recharge with reclaimed water. *Resour Conserv Recycl* 56: 105-116.
- Pescod M.B. (1992). *Wastewater Treatment and Use in Agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper 47, AO, Roma.
- Poole G., Sanden B. y Hays T. (2004). Soil, water, and crop production considerations in municipal wastewater applications to forage crops. In: *Proceedings, National Alfalfa Symposium, 13-15 December, 2004, San Diego, CA, UC Cooperative Extension, University of California, Davis 95616*.
- Rainer G. (2014). Hacia una ecología política del turismo y de la migración por estilo de vida el caso de la ruta del vino en Salta. VI Congreso Latinoamericano de Investigación Turística, Neuquén.
- Raschid-Sally L. y Jayakody P. (2008) Drivers and characteristics of wastewater agriculture in developing countries: results from a global assessment, International Water Management Institute (IWMI), Colombo, Sri Lanka.
- Rocha V., García, R., Moya F. y Tálamo, E. (2011). El agua subterránea en el valle de Cafayate – Tolombón. VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Hidrogeología Regional y Exploración Hidrogeológica. Salta, Argentina.
- SAGPyA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación) (2012). Estrategia Provincial para el Sector Agroalimentario – ESPA. Disponible en: <http://www.prosap.gov.ar/webDocs/EPESA-SaltaResolucion2012.pdf>.
- Scheierling S.M., Bartone, C., Mara, D.D. y Drechsel, P. (2010). Improving wastewater use in agriculture: an emerging priority. Policy Research Working Paper 5412. The World Bank.
- SDSN (Sustainable Development Solutions Network) (2015) Indicators and a Monitoring Framework for the Sustainable Development Goal, Revised working draft, Version 7, March 20, 2015.
- Shahid S.A. y Ahmed M. (2014) (eds.), *Environmental Cost and Face of Agriculture in the Gulf Cooperation Council Countries: Fostering Agriculture in the Context of Climate Change*, Gulf Research Centre Cambridge.
- Silva F., Albuquerque, A., Marecos do Monte, H., Cavaleiro, V. y Carvalho, A. (2012). Site selection for reclaimed water using GIS tolos. IWA Regional Conference on Water Purification and Reuse. Creta, Grecia.
- Toze S. (2006) Water reuse and health risks-real vs. perceived. *Desalination* 187: 41-51.
- USEPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) (1984). Process design manual for land treatment of municipal wastewater. Supplement of rapid infiltration and over land flow. Center for Environmental Research Information, Cincinnati.
- USEPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) (2004). Guidelines for water reuse. Technology Transfer and Support Division, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, Cincinnati.
- USEPA (Environmental Protection Agency) (2006). Process design manual for land treatment of municipal wastewater. Cincinnati, USA: US, Center for Environmental Research Information.
- Valencia R., Lago, A., Chafatinos, T., Ibarguren, R., Menegatti, R. y Ocaranza, A. (1970). Los Suelos de los Valles Calchaquíes. Levantamiento de suelos de los valles Calchaquíes, Salta (Primera parte). Gob. de Salta-UNLP. Salta.
- Wallace J.S. (2000). Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 82, 105–119.
- WEF (Water Environment Federation) (1990). *Natural Systems for Wastewater Treatment. Manual of practice*. USA.

ABSTRACT

This paper presents a preliminary assessment tool to identify suitable sites for irrigation with domestic wastewater by integrating Multi-Criteria Evaluation and GIS tools. The methodology was adapted to Cafayate conditions and characteristics, through interviews and surveys with local stakeholders and experts. Six restrictions and ten factors were selected. The final map showed that a large area, covering 3504 ha, is suitable for wastewater irrigation. The eligible areas were classified into three categories of suitability. High suitability areas were identified near the existing wastewater treatment plant. The tool allows the integration of multiple factors involved in site suitability assessment for the safe use of wastewater and can be modified for its application in other regions and/or for different purposes.

Keywords: Domestic wastewater, Multi-Criteria Evaluation, irrigation, Salta, Geographic Information Systems.