

APLICACIÓN DE ÍNDICES INTEGRADORES DE CALIDAD HÍDRICA AL PIEDEMONTES ANDINO ARGENTINO

• Emilie Lavie* •

Universidad Paris-Diderot, Francia

*Autor de correspondencia

• José A. Morábito • Santa E. Salatino •

Instituto Nacional del Agua, Argentina

Resumen

Lavie, E., Morábito, J. A., & Salatino, S. E. (julio-agosto, 2014). Aplicación de índices integradores de calidad hídrica al piedemonte andino argentino. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(4), 23-37.

Este trabajo presenta los resultados de la aplicación del Water Quality Index (WQI) del Canadian Council of Ministers of Environment, con el objeto de caracterizar de manera sintética y gráfica la calidad del agua, considerando un conjunto de parámetros biológicos, físicos y químicos en grandes cuencas. Este índice deja a criterio del investigador la elección de aquellos parámetros que resulten importantes para la zona y que además sean representativos de los distintos usos del agua. Se presentan aquí los resultados obtenidos a partir de una base de datos de calidad de agua de riego de dos cuencas del piedemonte andino argentino, considerando diferentes parámetros y límites sugeridos por el Departamento General de Irrigación de la provincia de Mendoza, un organismo internacional (FAO), las agencias de agua (AE) francesas y un país como Marruecos, cuyo entorno medioambiental es muy similar al analizado. Se concluye que la metodología lleva a una sobrevaloración del Factor 1 del WQI y permite a) manipular los resultados al incluir en la construcción del índice parámetros más/menos favorables; b) modificar dicho factor para disminuir su peso en el cálculo del índice, y c) no obstante todas las limitaciones detectadas, resulta útil para la comparación de la calidad del agua entre distintos sitios y/o cuencas regadías.

Palabras clave: índice de calidad del agua, riego, contaminación, Mendoza.

Introducción

Apoyándose en trabajos anteriores de Singh, Malika, Mohan, & Sinha (2004) y Simeonov *et al.*, (2003), Boyacıoğlu, Gündoğdu, & Boyacıoğlu (2013) sostienen que: "Surface waters are the

Abstract

Lavie, E., Morábito, J. A., & Salatino, S. E. (July-August, 2014). Application of an Integrated Water Quality Index in the Argentine Andean Piedmont. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(4), 23-37.

This paper presents the results from the application of the Water Quality Index (WQI) developed by the Canadian Council of Ministers of Environment in order to synthetically and graphically characterize water quality in large basins using a set of biological, physical and chemical parameters. This index allows the investigator to choose the parameters that are most important in a zone and that are also representative of the different water uses. This study presents the results obtained from an irrigation water quality database pertaining to two watersheds in the Argentine Andean foothills. The parameters and limits considered are based on those proposed by the General Irrigation Department of the province of Mendoza, an international agency (FAO), French water agencies (AE) and the country of Morocco whose environment is very similar to that of the one analyzed. It is concluded that the methodology leads to an overvaluation of the WQI Factor 1 and makes it possible to a) manipulate the results by including more/less favorable parameters in the construction of the index; b) modify this factor to decrease its weight in the calculation of the index and c) compare water quality among different irrigation sites and/or catchment basins, regardless of the limits detected.

Keywords: Irrigation, Mendoza, pollution, water quality index.

most vulnerable sources to pollution due to their easy accessibility for wastewater disposal. Both the natural processes as well as the anthropogenic influences together determine the quality of surface water". Asimismo, la conjunción de una aridez favorecedora de la salinización

de suelos y aguas, y la presencia de aglomerados urbanos de alta densidad poblacional que generan importantes actividades industriales y agrícolas hacen de los oasis del piedemonte de Mendoza en Argentina (tal y como Teherán en Irán, Damasco en Siria o Urumqi en China, entre muchos otros) uno de los medioambientes más vulnerables del mundo.

Con el objetivo de evaluar el impacto de la actividad humana sobre el recurso hídrico en varios de los oasis de la depresión cuyana argentina (figura 1), investigadores del Instituto Nacional del Agua (INA) y de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNCuyo con sede en Mendoza han venido realizando un seguimiento hidro-cualitativo (físico-químico y biológico) del agua de las cuencas de los ríos Mendoza y Tunuyán. Si bien los resultados obtenidos (Morábito *et al.*, 2005, 2007 y 2009; Lavie, 2009; Lavie, Morábito, Salatino, Bermejillo, & Fillipini, 2010) son interesantes, sólo han sido presentados los parámetros analizados en forma individual y hasta ahora no ha sido posible proponer a los encargados del manejo del agua una cartografía sencilla que permitiera ver —en forma integral— la variación espacial de la calidad —desde las fuentes de contaminación hasta los lugares de más distantes— para los distintos usos del agua (doméstico, para riego urbano y agrícola e industrial). Esto permitiría proponer nuevos marcos legales adaptados a la situación real de contaminación, modificando las normas vigentes.

El objetivo de este estudio es proponer una representación gráfica de la calidad del agua de ambas cuencas a través de un índice integrador que tome en cuenta el conjunto de los parámetros físico-químicos y biológicos registrados en la base de datos existente, y también analizar las diferencias en los resultados obtenidos al aplicar el índice de calidad del agua propuesto. Como resultado de una exhaustiva búsqueda bibliográfica, la elección recayó en el *Water Quality Index* del Canadian Council of Ministers of Environment (CCME). Este índice tiene la ventaja de dejar

al criterio del investigador la elección de aquellos parámetros que resulten importantes para la zona o región y que, además, sean representativos de los distintos usos del agua. Así, la bacteriología podría, por ejemplo, no estar integrada en un índice destinado a analizar la calidad del agua de riego y, por el contrario, sería indispensable para calificar la calidad del agua destinada a uso/consumo humano y/o animal. Del mismo modo, la salinidad —que podría ser un parámetro secundario para calificar cursos de agua ubicados en regiones húmedas en las que el abastecimiento agrícola es fundamentalmente pluvial— será un parámetro central para el caso de las aguas de los oasis bajo riego de la zona de Cuyo.

En función de lo expuesto y partiendo de una base de datos de calidad de agua de riego (río y red de canales), el trabajo propone la discusión de los resultados obtenidos mediante la selección de los siguientes cuatro índices integradores de calidad:

1. Índice WQI-DGI, definido a partir de los valores críticos (límites máximos permitidos) propuestos por el Departamento General de Irrigación (DGI) de la provincia de Mendoza.
2. Índice WQI-FAO, seleccionado con base en la importancia de este organismo internacional en todo lo referido a agricultura.
3. Índice WQI-AE, elegido entre los índices utilizados en la UE y definido en función de los criterios de la guía de aptitud de calidad de agua para riego de las agencias de agua (AE) francesas.
4. Índice WQI-MA, a fin de comparar los resultados obtenidos en los oasis de Mendoza con los de un país como Marruecos, cuyo entorno medioambiental es muy similar.

Contexto científico y metodología

El Water Quality Index (WQI)

Construir un índice sintético referido a la calidad global/integral del agua no es tarea

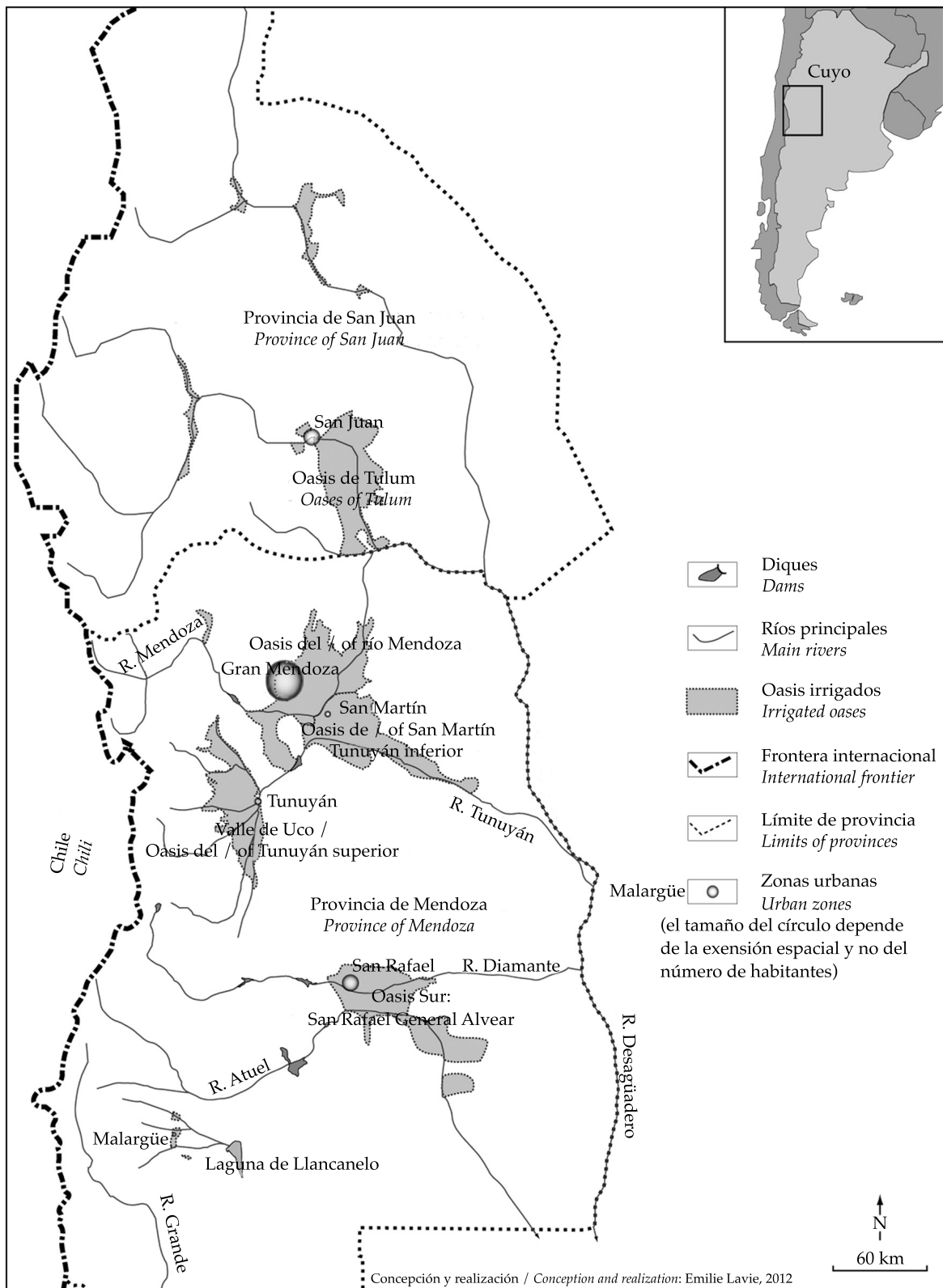


Figura 1. Los oasis de la depresión cuyana.

fácil, dado que los parámetros constitutivos del mismo no son iguales para una región que para otra (por ejemplo, mineralización). Por ello, definir un índice que contenga sólo un determinado grupo de parámetros no resulta ser un criterio del todo racional. Por el contrario, puede ser interesante hacerlo incluyendo parámetros en función de un uso determinado del agua. Dado que todos los seres humanos tienen —en relación con el agua— la misma vulnerabilidad, podría, por ejemplo, proponerse un índice global de calidad en función del uso/consumo humano, animal y doméstico. Un índice destinado a calificar la calidad del agua con destino al riego resulta más difícil de construir, ya que los diferentes cultivos reaccionan de manera distinta frente al impacto negativo de los variados parámetros (por ejemplo, la salinidad o los iones tóxicos). No obstante, en el ámbito mundial han sido propuestas distintas clasificaciones; a modo de ejemplo puede citarse la propuesta por FAO (Ayers & Westcot, 1994).

Durante la revisión bibliográfica se analizaron índices globales de calidad de agua, como el *SEQ-eau* de las agencias de agua (Agences de l'eau) de Francia; el Índice Biologique Global Normalisé (IBGN), norma Afnor 1992 (en Archaimbault & Dumont, 2010), usado para calificar la calidad biológica de los ríos; el *Indice de Qualité Physique et Chimique* (IPQB) (Hébert, 2005) su equivalente en Quebec, Canadá, y el *Water Quality Index* del Washington State Department of Ecology (Hallock, 2002) de Estados Unidos. Por otra parte, Chang, Chen, & Ning, 2001; Kumar y Alappat, 2004; Pesce y Wunderlin, 2004; Boyacıoğlu, 2007; Boyacıoğlu et al., 2013; Singh, Nath, Prasad y Nema, 2008, y Golge, Yenilmez y Aksoy, 2013, realizan interesantes aportes referidos a la aplicación de índices integradores de calidad del agua.

En este trabajo se eligió el *Water Quality Index* del Canadian Council of Ministers of Environment (CCME, 1999; Alberta Environment, 1995; Hébert, 2005; Khan, Tobin, Paterson, Khan, & Warren, 2005;

Lumb, Halliwell, & Sharma, 2006; Guzmán-Colis et al., 2011). La elección se fundamenta, por una parte, en que éste es un índice práctico cuando no se dispone de una base que contenga sólo datos biológicos (como en la mayoría de los índices citados) sino también físico-químicos y, por otra, tiene la ventaja de dejar a criterio del investigador la elección, debidamente fundamentada, de los parámetros que conformarán el índice. Otros índices analizados usan parámetros fijos que no resultan representativos para aplicar a la realidad cuyana, caracterizada por un fuerte uso agrícola. Es importante destacar que el WQI no puede ser usado de forma global, ya que no permitiría ninguna comparación con otros similares, oportunamente obtenidos para otras cuencas. No obstante, permite proponer subíndices sintéticos en función del objetivo elegido (Hébert, 2005; Khan et al., 2005).

Los autores proponen para la selección del *Water Quality Index* las siguientes siete etapas:

1. Elección de parámetros importantes para el curso de agua, el medio ambiente y el uso humano.
2. Fijación de objetivos tendientes a elevar las exigencias de calidad del recurso hídrico (la adopción de normas de contaminación, por ejemplo).
3. Fijación de fechas de registro comparables (idéntica escala temporal de las bases de datos de los distintos cursos de agua).
4. Cálculo del porcentaje de parámetros que no cumplen con los niveles objetivo prefijados (factor F1):

$$F1 = \left(\frac{\text{Número de parámetros que no cumplieron con los niveles deseables}}{\text{Número total de parámetros}} \right) \times 100$$

5. Cálculo del porcentaje de resultados que no cumplieron con los niveles objetivo prefijados (factor F2):

$$F2 = \left(\frac{\text{Número de resultados que no cumplieron con los niveles deseables}}{\text{Número total de resultados}} \right) \times 100$$

6. Cálculo del factor $F3$ en etapas:

- a) La magnitud de cada una de las desviaciones observadas en las pruebas que estuvieron fuera de conformidad:

$$\text{Desviación}_i = \left(\frac{\text{Valor del resultado fuera de conformidad}_i}{\text{Nivel deseable}_j} \right) - 1$$

- b) Dividir la suma de estas desviaciones por el número total de resultados:

$$snce = \frac{\sum_{i=1}^n \text{desviación}_i}{\text{Número total de resultados}}$$

- c) Calcular el factor $F3$:

$$F3 = \left(\frac{snce}{0.01 snce + 0.01} \right) \times 100$$

7. Cálculo del WQI (valores entre 0 y 100):

$$WQI = 100 - \left(\frac{\sqrt{F1^2 + F2^2 + F3^2}}{1.732} \right)$$

El Canadian Council of Ministers of Environment (CCME) determinó con base en el WQI cinco categorías que califican el agua de un determinado curso (cuadro 1).

El contexto de los ríos cuyanos

La región de Cuyo (Argentina), una depresión existente entre la Cordillera de Los Andes (al oeste) y las sierras de Córdoba y San Luis (al este) (figura 1) es una región árida-semiárida, en la que el desarrollo agrícola y urbano fue posible sólo gracias a la existencia de ríos andinos abastecidos por glaciares ubicados alrededor de los 6 000 msnm de altitud. Desde antes de la colonización, estos ríos fueron derivados con fines de riego agrícola y de uso doméstico (agro-alimentación). Una media docena de "oasis" concentran la actividad antrópica de la zona árida de Cuyo. Entre los más importantes están el Oasis Norte (ríos Mendoza y Tunuyán inferior, con $\approx 2\,000\text{ km}^2$) y el Oasis Centro (río Tunuyán superior, con $\approx 1\,000\text{ km}^2$). Este último también es conocido como el Valle de Uco, donde se ha producido la mayor expansión de superficie cultivada de los últimos 20 años destinada a vitivinicultura de alta calidad (cv Malbec).

Las cuencas de los ríos Mendoza y Tunuyán son abastecidas por el deshielo de los glaciares andinos, algunas lluvias, fundamentalmente de verano, y sobre todo por la fusión de la nieve anualmente acumulada en los Andes centrales, que constituye el mayor aporte de caudal (85%) (Abraham et al., 2007). Ambos ríos confluyen en una planicie regadía, conformada por sus respectivos conos de deyección, dando origen al Oasis Norte de Mendoza (ríos Mendoza y Tunuyán inferior). Por su parte, el río Tunuyán superior y su sistema de arroyos afluentes da origen al Oasis Centro y a la zona regadía conocida como Valle de Uco (unos 100 km al

Cuadro 1. Categorías de calidad de aguas en función del WQI (CCME, 1999).

Calificación	Rango de WQI	Definición
Excelente	95-100	La calidad del agua está muy cercana a los niveles naturales o deseables.
Bueno	80-94	La calidad del agua rara vez se aparta de los niveles naturales o deseables.
Aceptable	65-79	La calidad del agua se aparta algunas veces de los niveles naturales o deseables.
Marginal	45-64	La calidad del agua se aparta con frecuencia de los niveles naturales o deseables
Pobre	0-44	La calidad del agua se aparta casi siempre de los niveles naturales o deseables.

sur de la ciudad de Mendoza), conformada por los departamentos de San Carlos, Tunuyán y Tupungato. En el Oasis Centro, la zona agrícola regadía está ubicada aguas arriba de estas tres ciudades, fuera de los impactos antrópicos de origen urbano e industrial. Por el contrario, en el Oasis Norte, el área regadía, ubicada aguas abajo, recibe todo el impacto de la contaminación antrópica producida por el asentamiento poblacional del Gran Mendoza (más de un millón de habitantes) y sus industrias (figura 2). No menos importante resulta el hecho de que una parte de las aguas superficiales se infiltra en las áreas de recarga y alimenta los respectivos acuíferos subterráneos que también son vulnerables a la contaminación.

Base de datos (INA-UNCuyo)

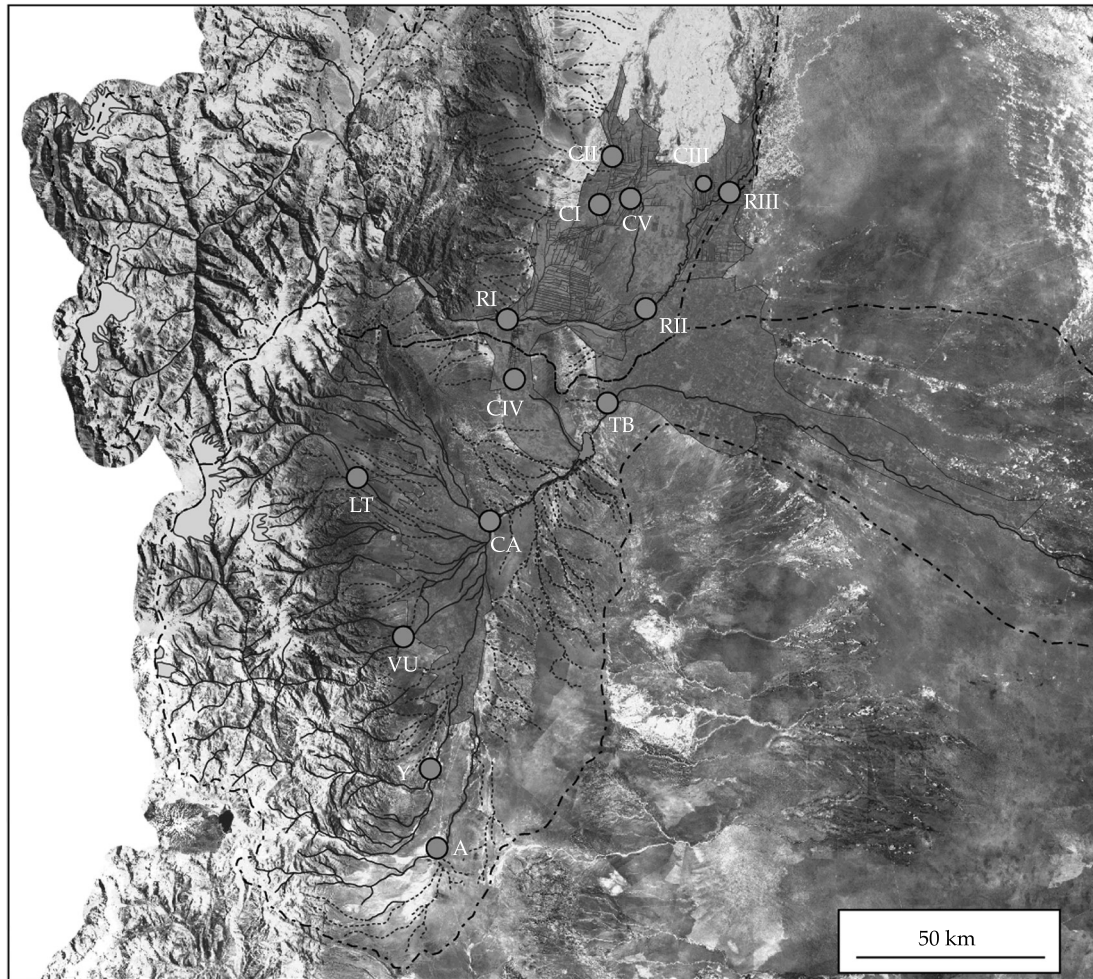
El Centro Regional Andino (CRA) del Instituto Nacional del Agua (INA), en conjunto con la Facultad de Ciencias Agrarias (FCA) de la Universidad Nacional de Cuyo (UNC), ha venido realizando el monitoreo de la calidad del agua mediante muestreos mensuales (desde 2003 en el río Mendoza y desde 2007 en el río Tunuyán superior). Se tienen, entonces, cinco años de muestreo en común para los dos ríos (2007-2011), totalizando diez registros mensuales por año (en invierno (junio/julio), la red de riego no lleva agua y la mayoría de los cultivos está en receso vegetativo, por lo que se procede a la limpieza y mantenimiento de los canales de tierra; en enero, vacaciones de verano, tampoco se realiza la toma de muestras). Los puntos que conforman la base de datos, correspondientes a los sitios de muestreo, fueron seleccionados atendiendo a la caracterización de la calidad del agua con fines de riego y a la identificación de posibles causales de contaminación.

Para el río Mendoza (figura 2) fueron elegidos ocho puntos: tres en el río (RI, RII y RIII), y cinco en la red de canales de riego (CI al CV). El punto RI corresponde al sitio de derivación de las aguas del río Mendoza hacia el oasis regadío (valor base). A partir del mismo, casi no circula agua en el río hasta el punto RII, ubicado en la

mitad de la cuenca, a nivel de la resurgencia del acuífero que reabastece el río. El punto RIII corresponde a la salida del oasis y entre ambos (RII y RIII) existe una planta depuradora de efluentes domésticos (Paramillos) que produce vuelcos ocasionales.

En lo que se refiere a la red de canales, el punto CI está ubicado aguas abajo del Gran Mendoza (punto final del canal-colector Cacique Guaymallén) y sirve como referencia a CII (entre ambos puntos se encuentra la planta depuradora Campo Espejo, con vuelcos ocasionales a la red de riego) y a CV (entre ambos puntos se suma el aporte de un dren colector de desagües industriales, el colector Pescara). El punto CIII corresponde al final de la red y es un canal recientemente revestido, de muy poca vulnerabilidad a la contaminación de origen antrópico, cuyas aguas presentan una calidad comparable a RI. Por último, CIV, ubicado en la margen derecha del río, es el único punto que sólo recibe contaminación de origen agrícola (fertilizantes, abonos y productos fitosanitarios).

En el río Tunuyán se eligieron cuatro puntos correspondientes a sitios de muestreo: (LT), el más alto, sobre el Dique Las Tunas en el río del mismo nombre, afluente del Tunuyán; (VU), Dique Valle de Uco, a la entrada del oasis sobre el río Tunuyán superior; (Y) Arroyo Yaucha y (A) Arroyo Aguanda. En el Dique Valle de Uco se deriva para el riego de la subcuenca alta (50 000 ha en la zona conocida como Valle de Uco) sólo el 16% del caudal disponible, el resto es almacenado aguas abajo en el Dique El Carrizal y utilizado para el riego de la subcuenca baja (río Tunuyán inferior, 84 000 ha regadías), cultivada con vid, frutales de carozo y hortalizas (Chambouleyron *et al.*, 2002). Aguas abajo de los sectores agrícolas se ubica la ciudad de Tunuyán. En ella se concentra el agua del río y de los arroyos ya mencionados, sumados a otros nacidos de la resurgencia del acuífero freático. Los sitios de muestreo aquí seleccionados fueron Costa Anzorena (CA), ubicado antes de la entrada del río al Embalse El Carrizal y Dique Tiburcio Benegas (TB), sobre el derivador situado aguas abajo del Dique El Carrizal. El área de influencia del río Tunuyán en su tramo



--- Cuenca de los ríos Mendoza y Tunuyán
Bassins of Mendoza and Tunuyán Rivers oases

Glaciares
Glaciars

Ríos permanentes
Permant rivers

Ríos transitorios
Intermittent rivers

Embalses
Dam lakes

Oasis - zonas regadías
Oases - irrigated zones

Red de riego (sólo oasis del río Mendoza)
Irrigation network (only Mendoza River oases)

Puntos de muestreo
Samples ponts

Concepción y realización / Conception and realization: Emilie Lavie, 2012
Fuente / Source: Imágenes INA / datos INA-FCA / Images INA / data INA-FCA

Figura 2. Cuencas de los ríos Tunuyán y Mendoza: ocupación del suelo y puntos de muestreo.

inferior comprende las tierras regadías del este de Mendoza.

Los registros de la base de datos corresponden a los siguientes parámetros:

1. Físicoquímicos y metales pesados: pH, conductividad eléctrica a 25 °C (CE), demanda química de oxígeno (DQO), relación de adsorción de sodio (RAS), cloruros, sodio, po-

tasio, calcio, magnesio, carbonatos y bicarbonatos, nitratos, fosfatos, fósforo, plomo, cobre, zinc y cromo (este último fue sólo analizado para el río Mendoza). También se poseen registros de sólidos sedimentables 10 minutos (SS10) y de sólidos totales (ST), fijos (STF) y volátiles (STV).

2. Biológicos: oxígeno disuelto (OD), bacterias aerobias mesófilas (BAM) y coliformes (totales y fecales).

En todos los muestreos se registró, además, la temperatura del agua y el caudal pasante.

Índices de calidad de aguas (WQI)

Dado el número de estudios sobre índices cualitativos sintéticos y de límites, normas y recomendaciones existentes, es difícil proponer un índice científicamente aceptable. Este trabajo propone utilizar la metodología del WQI (CCME) en función de varios objetivos de calificación. La finalidad original fue obtener un índice de aptitud del agua de riego con fines agrícolas en función de la base de datos disponible. En la provincia de Mendoza, la administración del agua está a cargo del Departamento General de Irrigación (DGI). La normativa vigente (Resolución 778/96) establece límites máximos (permitidos y tolerados) para el vertido a la red de riego por lo que se la eligió como referencia (WQI-DGI). A fin de comparar resultados, se seleccionaron los índices elaborados con base en las recomendaciones de FAO (WQI-FAO) y de las Agencias de Agua de Francia (WQI-AE; MEDD y Agences de l'Eau, 2003). Por último, se ha querido aplicar a las aguas de los ríos Mendoza y Tunuyán la normativa vigente en un país de entorno muy similar, en el que existe mucho riego, como Marruecos (WQI-MA, Ministerio de la Energía, el Agua y el Ambiente, SEEE, 2007, disponible en línea).

WQI-DGI

Para la construcción del índice WQI-DGI, en función de la normativa provincial (Resolución

778/96), se utilizaron sólo aquellos parámetros físico-químico-biológicos que figuraran con valores límites permitidos. En el cuadro 2 se presentan los mencionados parámetros con sus unidades de medida y límites máximos, pudiendo apreciarse un cierto equilibrio entre físico-químicos, metales pesados y bacteriología.

WQI-AE

El cuadro 3 permite analizar los parámetros seleccionados por las agencias del agua de Francia (AE) para la construcción del WQI. En este país existen distintas clasificaciones, cuyos límites permitidos varían en función de los distintos usos del agua (riego, consumo humano y animal, etcétera).

WQI-FAO

Así como la OMS ha elaborado recomendaciones de calidad para el agua destinada al consumo humano, la FAO propone normativas de calidad para el agua con fines de riego. Dichas recomendaciones son más difíciles de usar que las normativas oficiales de los países, puesto que están compuestas por tres guías con diferentes límites: uso sin restricción, uso con restricciones (bajas a altas) e imposibilidad de uso (Ayers & Westcot, 1994). Siendo las aguas de Mendoza naturalmente salinas, para la confección del WQI-FAO se decidió utilizar la guía de uso con restricciones bajas a altas; en ella, los límites son bastante altos, por lo que la calidad de los ríos tendería a ser *buena*. Es de notar que —con excepción del pH— sólo la mineralización está considerada; no hay mención de parámetros biológicos, metales pesados ni sólidos (cuadro 4). No se ha tenido en cuenta el RAS, ya que habría que elegir un límite para cada nivel de conductividad eléctrica. Cambiar el límite no es aceptable en la metodología.

WQI-MA

El índice propuesto a partir de las normas marroquíes (cuadro 5) incluye entre los

Cuadro 2. Parámetros y límites del WQI-DGI.

Parámetros	Unidad	Valor límite elegido
Temperatura	°C	30
pH	-	6.5 - 8.2
Conductividad eléctrica (CE)	μS/cm a 25 °C	900
Relación de adsorción de sodio (RAS)	-	6
Sodio (Na ⁺)	mEq/l	6.52
Cloruros (Cl ⁻)	mEq/l	5.65
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mEq/l	5.21
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mEq/l	45
Fosfatos (PO ₄ ³⁻)	mEq/l	0.4
Coliformes fecales	u/100 ml	200
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l O ₂	75
Sólidos sedimentables en 10 min	ml/l	0.5

Referencia: la Resolución 778/96 del DGI posee dos límites máximos: permitido y tolerado. Para el WQI-DGI se utilizó sólo el primero.

Cuadro 3. Parámetros y límites del WQI-AE.

Parámetros	Unidad	Límite elegido
Residuos sólidos secos a 105 °C	mg/l	3 500
Cloruros (Cl ⁻)	mEq/l	19.77
Plomo (Pb)	mg/l	2
Cobre (Cu)	mg/l	5
Zinc (Zn)	mg/l	5
Coliformes totales	u/100 ml	1 000
Coliformes fecales	u/100 ml	100

parámetros para su cálculo la bacteriología (coliformes fecales), la salinidad (conductividad eléctrica, cloruros, sodio y sulfatos), los metales pesados (plomo, cobre y zinc) y un parámetro físico como la temperatura (la turbidez no parece ser un parámetro de interés en este país).

No resulta factible incluir todas las bases de datos usadas en el cálculo de WQI, ya que se dispone de aproximadamente 750 muestras en las que se han analizado de 6 a 12 parámetros, según el índice analizado. El cuadro 6 muestra los parámetros, resultados y factores usados para calcular el WQI-DGI y la calificación resultante.

Resultados

La representación cartográfica de las dos cuencas de estudio—ríos Mendoza y Tunuyán—

permite mostrar los valores del índice WQI obtenidos en función de la metodología del CCME de Canadá y calculados en función de los registros de los diferentes parámetros que integran la base de datos correspondiente a las mediciones en los ríos y en la red de canales (figuras 3a a 3d).

La figura 3a (WQI-DGI) corresponde al índice obtenido con base en normas de vuelco y aparece como algo preocupante. Si bien cuatro de los cinco puntos ubicados aguas arriba de las actividades antrópicas son de *excelente a buena* calidad, el punto VU sólo tiene calidad *aceptable*, aunque la presión antrópica que recibe es mínima. El punto LT sólo tiene un parámetro por encima de los límites (fosfatos); los puntos de *buena calidad* (RI, A e Y) tienen dos parámetros altos cada uno de ellos. Los puntos con calidad *aceptable* (CI, CII, VU, CA y TB)

Cuadro 4. Parámetros y límites del WQI-FAO.

Parámetros	Unidad de medida	Límite elegido
pH	-	6.5 - 8.4
Conductividad eléctrica (CE)	$\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25 °C	3 000
Cloruros (Cl^-)	mEq/l	10
Sodio (Na^+)	mEq/l	9
Nitratos (NO_3^-)	mg/l	30
Bicarbonatos (HCO_3^-)	mEq/l	8.5

Cuadro 5. Parámetros y límites del WQI-MA.

Parámetros	Unidad de medida	Límite elegido
Temperatura	°C	35
pH	-	6.5 - 8.4
Conductividad eléctrica (CE)	$\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25 °C	12 000
Cloruros (Cl^-)	mg/l	9.9
Sodio (Na^+)	mg/l	3
Sulfatos (SO_4^{2-})	mEq/l	5.2
Plomo (Pb)	mg/l	5
Cobre (Cu)	mg/l	2
Zinc (Zn)	mg/l	2
Coliformes fecales	u/100 ml	1 000

corresponden a sitios con contaminación media y tienen cinco parámetros (fosfatos, coliformes fecales, sulfatos, RAS y CE), que sobrepasan el límite permitido por el DGI para vuelcos; y los puntos CV y RIII, muy contaminados, tienen una calidad *pobre*, presentando de cinco a siete parámetros (todos los anteriores más la DQO y los sólidos), con fuerte amplitud en sus valores. El índice WQI-DGI permite distinguir entre los puntos con pocos parámetros problemáticos y aquellos con muchos problemas de calidad. No obstante, de su aplicación surge una posible sobrevaloración del factor 1 (porcentaje de parámetros fuera del límite) en el cálculo.

Con excepción del punto VU, que tiene en su cuenca coliformes fecales y alta salinidad —debidos a la presencia de ganadería extensiva y al aporte natural de sulfatos (por la presencia de yeso en la cuenca), respectivamente—, el WQI-DGI muestra muy bien el impacto de las actividades antropogénicas sobre la calidad del agua: los sitios CI, CII (en río Mendoza), y CA y

TB (en río Tunuyán) han sido clasificados como de calidad *acceptable* y los puntos CV y RIII —víctimas de vuelcos de efluentes domésticos e industriales— tienen calidad *marginal*, aunque sus caudales sumados representen menos del 20% de lo ingresado en RI. Vale aclarar que no se han incluido en el análisis los sitios RII, CIII y CIV, por no contar con registros de nitratos ni de fosfatos (lo que los hace no comparables). Los resultados muestran un aumento de las variables CE, fosfatos y bacteriología en el sentido aguas arriba-aguas abajo, que puede ser atribuido a las actividades industriales, agrícolas y urbanas que se registran en el área. En el río Tunuyán, el índice no refleja la mejora de la calidad entre los sitios CA (antes del embalse) y TB (dique derivador de la subcuenca inferior), a pesar de la decantación y diluciones ocurridas en el Dique El Carrizal. Los valores del índice WQI-DGI —presentados a nivel espacial— arrojan variaciones aguas arriba y aguas abajo de la presencia de impacto

Cuadro 6. Modelo de tabla usada para determinar los WQI: resultados del WQI-DGI.

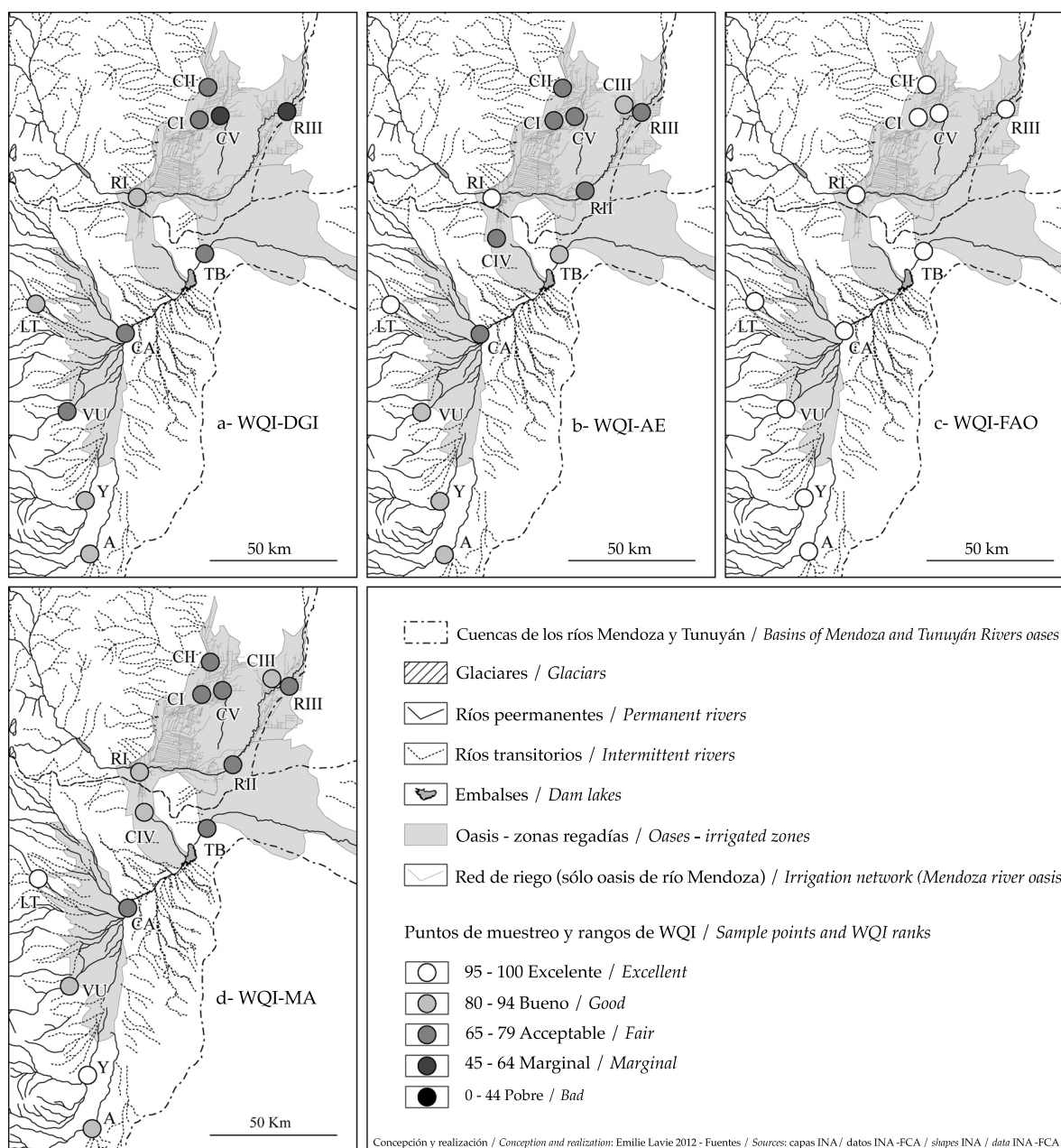
Sitio	Factor 1			Factor 2			Factor 3				WQI	Rango
	Número de parámetros que no cumplieron con el nivel máximo	Total número de parámetros	Factor 1: % de parámetros que no cumplieron con el nivel máximo	Número de resultados que no cumplieron con el nivel máximo	Total número de resultados	Factor 2: % de resultados que no cumplieron con el nivel máximo	Suma de la desviación estándar de los resultados sin conformidad	Total número de resultados	Magnitud (cfc)	Factor 3: magnitud con la cual los valores de las pruebas se desviaron de los niveles máximo		
RI	2	12	16.7	103	431	23.9	26.3	431	0.06	5.8	83	Bueno
RIII	5	12	41.7	129	262	49.2	701.4	262	2.68	72.8	62	Marginal
CI	5	12	41.7	147	391	37.6	990.1	391	2.53	71.7	67	Aceptable
CII	5	12	41.7	190	445	42.7	818	445	1.84	64.8	65	Aceptable
CV	7	12	58.3	213	446	47.8	87 686	446	196	99.5	56	Marginal
Valoración final para el río Mendoza											67	Aceptable
VU	5	12	41.7	137	438	31.3	143.9	438	0.33	24.7	70	Aceptable
LT	1	12	8.3	28	425	6.6	22.7	425	0.05	5.1	94	Bueno
A	2	12	16.7	48	452	10.6	232.9	452	0.52	34.0	88	Bueno
Y	2	12	16.7	45	451	10.0	48.3	451	0.11	9.7	89	Bueno
CA	5	12	41.7	154	445	34.6	616.4	445	1.39	58.1	68	Aceptable
TB	4	12	33.3	133	392	33.9	254.4	392	0.65	39.4	72	Aceptable
Valoración final para el río Tunuyán											80	Bueno

antrópico y coinciden con lo afirmado por Morábito *et al.* (2005, 2007 y 2009), Lavie (2009), Lavie, Morábito, & Salatino (2008) y Lavie *et al.* (2010).

Los resultados obtenidos con el WQI-AE (figura 3b) fueron menos contrastantes: se observan dos puntos con calidad *excelente*: LT y RI, con notas de 98 y 99/100, respectivamente, sin parámetros fuera del límite elegido y cinco puntos con agua de *buena* calidad (VU, A, Y, TB y CIII), que tienen casi siempre problemas con los coliformes totales y fecales, pero presentan una amplitud de valores relativamente baja. Esta presencia bacteriológica podría estar causada por la actividad ganadera existente aguas arriba de los puntos Y, A y VU, y por algunos otros ocasionales focos de contaminación que afectan a los puntos bajos de ambas cuencas (TB y CIII). Los puntos restantes presentan una calidad *aceptable*, tienen problemas bacteriológicos (con

una mayor amplitud) y están ubicados aguas abajo de los vuelcos domésticos e industriales (CI, CII, CV, CA, RII y RIII). En este caso, lo determinante no es la presencia de sulfatos sino el peso de los dos parámetros bacteriológicos respecto de los siete que intervienen en la confección del índice (los coliformes fecales están incluidos en los coliformes totales, por lo que su peso se duplica dentro del factor 1). El factor 1 parece jugar un papel importante en el modo de cálculo, pero los factores 2 y 3 —que toman en cuenta el porcentaje de cada registro y la amplitud de los mismos fuera del límite permitido— discriminan los puntos con verdadera contaminación, haciendo que el agua pase de clase *buena* a *aceptable*.

Para elaborar el WQI-FAO, se eligió la restricción “leve a moderada”, ya que los límites correspondientes a la categoría “uso sin restricción” hubieran dado por resultado aguas



No se ha incluido en el WQI-DGI y WQI-FAO los registros correspondientes a los sitios RII, CIII y CIV, ya que no se tienen datos sobre nitratos y fosfatos.

Figura 3. Rangos de WQI para cada punto de muestreo.

de clase “pobre”. No obstante, el resultado obtenido tampoco fue suficientemente satisfactorio, puesto que todos los sitios resultaron con aguas de calidad *excelente* (incluso CII y CV en el río Mendoza), como puede verse en la figura 3c. En efecto y como empíricamente

los agricultores conocen, las aguas de Mendoza son aptas para riego, con algunas restricciones en algunos sectores. El índice WQI-FAO es uno de los que más resalta la importancia de la selección de los límites máximos y de los parámetros que integran su cálculo.

Por último, el WQI-MA (figura 3d), construido a partir de normas marroquíes, permite apreciar una clara distinción de la calidad del agua entre los sitios de muestreo afectados por el impacto de la presión antrópica y los que no lo están. Dos puntos no tienen parámetros problemáticos y están clasificados como de calidad *excelente*: LT (99/100) y Y (100/100). Los puntos ubicados aguas arriba de la actividad antrópica (VU, A, RI) o protegidos de la contaminación (CIII y CIV) sólo tienen uno o dos parámetros altos (salinidad, sulfatos y/o sodio y/o coliformes fecales) y están clasificados como de *buena* calidad. Los puntos restantes, ubicados aguas abajo de actividades antrópicas tienen, a la vez, presencia de sulfatos, sodio y coliformes fecales, por lo que resultaron clasificados como de calidad *acceptable*. Los parámetros elegidos para este índice están bastante equilibrados: metales pesados, mineralización y bacteriología (a pesar de no incluir a los sólidos), pero al igual que en los otros índices, el WQI-MA demuestra una clara sobrevaloración del factor 1 en su cálculo, como ya lo había señalado Hébert (2005). En el caso de las cuencas de Mendoza, el índice WQI-MA refleja mejor las diferencias entre las aguas de la parte alta (casi sin actividad antrópica) de las de la parte baja (donde hay mayor impacto de los diferentes usos). No obstante, existen dos excepciones: los sitios CIII y CIV que, aunque ubicados dentro del oasis del río Mendoza, no reciben contaminación industrial ni urbana, sólo vuelcos de desagües agrícolas, con aguas de *buena* calidad. Se puede entonces afirmar que el índice elaborado con base en la normativa de Marruecos maximiza la contaminación urbana e industrial.

Discusión

La utilización de la metodología propuesta para la clasificación de las aguas de los ríos Mendoza y Tunuyán superior arrojó resultados que confirmaron valores y tendencias de estudios anteriores y permitió distinguir diferencias de calidad entre los sitios ubicados

aguas arriba (fuentes) —casi sin contaminación de origen antrópico— de los que se encuentran aguas abajo y exhiben mayores registros de polución. Si bien la elección de los parámetros seleccionados para la confección del índice propuesto (WQI) afecta el resultado final, permite al investigador combinarlos para que la caracterización de las aguas sea la que más se acerque a la realidad de cada caso de estudio.

Los resultados del presente trabajo coinciden con los obtenidos por autores como Hébert (2005), en que el cálculo favorece claramente al factor 1 (número de parámetros problemáticos) y no la diferencia entre resultados y límites máximos de los parámetros. Como puede verse en los resultados obtenidos, la elección de los parámetros está muy relacionada con el peso del factor 1 en el cálculo del índice de calidad (duplicación de la contaminación microbiológica al considerar coliformes fecales junto con los coliformes totales y/o del impacto de la sodicidad si se suma al catión sodio la variable RAS). Por otro lado, si en el cálculo del índice se eligen aquellos parámetros que no representen una disminución de la calidad, por más que se multipliquen entre sí el factor 1 se verá acotado, lo que se traducirá en un índice de calidad más alto, aunque el agua sea, en realidad, de calidad inferior.

Conclusión

Uno de los objetivos del estudio fue encontrar una manera de presentar en forma sintética un conjunto de parámetros cualitativos que permitiese calificar la calidad de las aguas para riego en las áreas de influencia de los ríos Mendoza y Tunuyán superior. Se pretendió, además, complementar mediante cartografía espacial la presentación de anteriores resultados basados en la visualización de la variación temporal y amplitud de los registros de cada parámetro de la base de datos. Como ha sido destacado por Boyacıoğlu *et al.* (2013), el WQI del CCME: “showed that information produced based on water quality data variation and correlations can be of great

value for water managers to develop realistic action plans". De hecho, un aporte interesante de nuestro trabajo puede verse en la figura 3. De esta manera, un gestor/administrador/investigador puede observar rápidamente y en forma gráfica la variación espacial de la calidad, así como apreciar la importancia en la elección de los parámetros y de los límites que mejor representen la realidad de la cuenca de acuerdo con el uso del agua que se pretende evaluar.

Una vez elegido el *Water Quality Index* (WQI) del Canadian Council of Ministers of Environment (CCME), que deja librada al investigador la elección de los parámetros intervinientes en función de su importancia específica para cada caso de estudio y de los límites máximos deseados (normativa), pudieron compararse las clasificaciones resultantes de la aplicación de los cuatro diferentes índices oportunamente elegidos. De los resultados obtenidos puede concluirse que la metodología lleva a una sobrevaloración del factor 1 y permite la manipulación de los resultados, al incluir en la construcción del índice parámetros más/menos favorables para definir una clase de agua. Así, Hébert (2005) propone modificar dicho factor (cambiándolo por el de un valor medio entre los factores 1 y 2) para disminuir su peso en el cálculo. No obstante todas las limitaciones detectadas, la metodología resulta útil para la comparación de la calidad del agua entre distintos sitios y/o cuencas de zonas regadías.

Agradecimientos

Este artículo contó con la colaboración de Rocío Hernández Rosa Medina, Susana Miralles, Cora Dediol, Silvia Andre, Susana Campos, Alicia Stocco, Dora Genovese, José Maffei, Leandro Mastrantonio, Adriana Bermejillo y María F. Filippini de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo, Argentina.

Nuestro agradecimiento también al ingeniero Víctor Burgos y a la señorita Noelia Ortiz por su apoyo en la aplicación de SIG.

Recibido: 04/10/12

Aceptado: 29/10/13

Referencias

- Abraham, E., Abad, J., Lora-Borrero, B., Salomón, M., Sánchez, C., & Soria, D. (Mayo, 2007). Caracterización y valoración hidrológica de la cuenca del río Mendoza mediante elaboración de modelo conceptual de evaluación. *Actos del Congreso Argentino del Agua* (14 p.). Tucumán: Comisión Nacional del Agua.
- Alberta Environment (1995). *Alverta River Water Quality Index*. Recuperado de <http://environment.alberta.ca/177.html#methodology>.
- Archaimbault, V., & Dumont, B. (2010). L'indice Biologique Global Normalisé (IBGN), principes et évolution dans le cadre de la Directive cadre européenne sur l'eau. *Sciences, Eaux et Territoires*, 1, 36-39.
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1994). *Water Quality for Agriculture*. Publication for FAO. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 29(rev. 1). Recuperado de <http://www.fao.org/DOCREP/003/T0234E/T0234E00.HTM>.
- Boyacıoğlu, H. (2007). Development of a Water Quality Index Based on a European Classification Scheme. *Water SA*, 33, 101-106.
- Boyacıoğlu, H., Gündoğdub, V., & Boyacıoğlu, H. (2013). Investigation of Priorities in Water Quality Management Based on Correlations and Variations. *Marine Pollution Bulletin*, 69, 48-54.
- CCME (1999). *Recommandations canadiennes pour la qualité de l'eau*. Recuperado de <http://www.ec.gc.ca/ceqg-rcqe/English/ceqg/water/default.cfm#agr>.
- Chang, N., Chen, H. W., & Ning, S. K. (2001). Identification of River Water Quality Using the Fuzzy Synthetic Evaluation Approach. *Journal of Environmental Management*, 63, 293-305.
- Golge, M., Yenilmez, F., & Aksoy, A. (2013). Development of Pollution Indices for the Middle Section of the Lower Seyhan Basin (Turkey). *Ecological Indicators*, 29, 6-17.
- Guzmán-Colis, G., Thalasso, F., Ramírez-López, E. M., Rodríguez-Narciso, S., Guerrero-Barrera, A. L., & Avelar-González, F. J. (2011). Evaluación espacio-temporal de la calidad del agua del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 89-102.
- Hallock, D. (2002). *A Water Quality Index for Ecology's stream Monitoring* (17 pp). Internal publication No. 02-03-052. Washington: Washington State Department of Ecology. Recuperado de <http://www.ecy.wa.gov/biblio/0203052.html>.
- Hébert, S. (2005). *Comparaison entre l'indice de la qualité générale de l'eau du Québec (IQBP) et l'indice de qualité des eaux du CCME (IQE) pour la protection de la vie*

- aquatique, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction du suivi de l'état de l'environnement (11 pp). Envirodoq no ENV/2005/0265, Collection n°QE/170. Montréal: Ministerio del Desarrollo Sustentable. Recuperado de http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/vie-aqua/Comparaison.pdf.
- Khan, A. A., Tobin, A., Paterson, R., Khan H., & Warren R. (2005). Application of CCME Procedures for Deriving Site-Specific Water Quality Guidelines for the CCME Water Quality Index. *Water Quality Research Journal of Canada*, 40(4), 448-456.
- Kumar, D., & Alappat, B. J. (2004). Selection of the Appropriate Aggregation Function for Calculating Leachate Pollution Nindex. *ASCE Pract. Period. Hazard. Toxic Radioact. Waste Management*, 8, 253-264.
- Lavie, E. (2009). *Activités anthropiques et qualité de l'eau dans l'oasis de Mendoza (Argentine) : diagnostic, enjeux et durabilité* (385 pp). Tesis de doctorado en Geografía. Burdeos: Universidad de Burdeos.
- Lavie, E., Morábito, J. A., & Salatino, S. E. (2008). *Problèmes de pollution phosphatée de l'eau d'irrigation en zones aval d'oasis : le cas de la quatrième zone agricole irriguée de l'oasis du río Mendoza, Argentine*. XIII° World Water Congress of the IWRA (International Water Resource Association), Montpellier. Francia, 1-4 Sept.
- Lavie, E., Morábito, J., Salatino, S., Bermejillo, A., & Filippini, M. F. (2010). Contaminación por fosfatos en el oasis bajo riego del río Mendoza. *Rev. FCA UNCuyo*, 42(1), 169-184.
- Lumb, A., Halliwell, D., & Sharma, T. (2006) Application of CCME Water Quality Index to Monitor Water Quality: a Case Study of the Mackenzie River Basin, Canada. *Environmental Monitoring Assessment*, 113(1-3), 411-429.
- MEDD et Agences de l'Eau (2003). *Système d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau (SEQ-Eau)* Recuperado de <http://rhin-meuse.eaufrance.fr/IMG/pdf/grilles-seq-eau-v2.pdf>.
- Morábito, J., Salatino, S., Medina, R., Zimmermann, M., Filippini, M., Bermejillo, A., Nacif, N., Campos, S., Dediol, C., Pizzuolo, P., Genovese, D., & Mastrantonio, L. (2005). Calidad del agua en el área regadía del río Mendoza (Argentina). *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias, Centro de Ediciones Académicas*, 37(1), 1-23.
- Morábito, J., Salatino, S., Medina, R., Zimmermann, M., Filippini, M., Bermejillo, A. et al. (2007). Calidad del agua en el área regadía del río Mendoza: temperatura, pH, iones solubles y sólidos. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*, 39(1), 9-20.
- Morábito, J., Salatino, S., Filippini, M., Bermejillo, A., Medina, R., Zimmermann, M., Nacif, N., Campos, S., Dediol, C., Mastrantonio, L., Hernández, R., Genovese, D., & Stocco, A. (2009). Evaluación de la calidad del agua en áreas de regadío del río Tunuyán Superior (Prov. de Mendoza) para un aprovechamiento racional y sustentable (1era parte). Chubut, Argentina: Conagua Trelew.
- Pesce, S. F., & Wunderlin, D. A. (2004). Use of Water Quality Indices to Verify the Impact of Córdoba City (Argentina) on Suquia River. *Water Resources*, 34, 2915-2926.
- SEEE (Secrétariat d'Etat auprès du Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement) (2007). *Chargé de l'Eau et de l'Environnement. Normes de qualité – eaux destinées à l'irrigation*. Recuperado de http://www.eau-tensifs.net/fileadmin/user_files/pdf/publications/3_Irrigation.pdf.
- Simeonov, V., Stratis, J. A., Samara, C., Zachariadis, G., Voutsas, D., Anthemidis, A., Sofoniou, M., & Kouimtzis, Th. (2003). Assessment of the Surface Water Quality in Northern Greece. *Water Resources*, 37., 4119-4124.
- Singh, K. P., Malika, A., Mohan, D., & Sinha, S. (2004). Multivariate Statistical Techniques for the Evaluation of Spatial and Temporal Variations in Water Quality of Gomti River (India) - A Case Study. *Water Research*, 38, 3980-3992.
- Singh, R. P., Nath, S., Prasad, S. C., & Nema, A. K. (2008). Selection of Suitable Aggregation Function for Estimation of Aggregate Pollution Index for River Ganges in India. *Journal of Environment Engineering – ASCE*, 134, 689-701.

Dirección institucional de los autores

Dra. Emilie Lavie

Universidad Paris-Diderot
PRES Sorbonne-Paris-Cité
UMR CNRS-8586 PRODIG Francia
5 rue T. Mann, cc7001 75205 Paris
Cedex 13, France
Teléfono: +33 (157) 277 271
emilie.lavie@univ-paris-diderot.fr

Ing. José A. Morábito

Instituto Nacional del Agua (INA)
Centro Regional Andino (CRA)
Programa de Riego y Drenaje
Belgrano Oeste 210, piso 3, oficina 324
5500 Ciudad de Mendoza, Argentina
Teléfono: +54 (261) 4286 993
jmorabito@ina.gov.ar

Facultad de Ciencias Agrarias
Universidad Nacional de Cuyo, Argentina

Ing. Santa E. Salatino

Instituto Nacional del Agua (INA)
Centro Regional Andino (CRA)
Programa de Riego y Drenaje
Belgrano Oeste 210, piso 3, oficina 324
5500 Ciudad de Mendoza, Argentina
Teléfono: +54 (261) 4286 993
ssalatino@ina.gov.ar