

Estrategias de toma de decisiones para la gestión integrada de ambientes acuáticos en Salta, Argentina

Área temática: Calidad Ambiental

Abdenur Araos Macarena*, Gutiérrez Cacciabue Dolores, Rajal Verónica

INIQUI –CONICET, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta. Av. Bolivia 5150, Salta, Argentina. mabdenura@gmail.com, dolo83@gmail.com, vbrajal@gmail.com

Área temática: Calidad Ambiental

RESUMEN

La problemática del agua genera preocupación a nivel mundial en lo que concierne a su calidad, disponibilidad, acceso y usos. Para evaluar dicha calidad suelen realizarse monitoreos utilizando variables que deben cumplir valores límites establecidos por legislación. Estos datos son significativos para la gente idónea en el tema, pero de poca importancia para la población que pone en riesgo su salud y la del agua. Para la toma de conciencia sería factible aplicar metodologías que proporcionen una descripción general y de fácil comprensión, teniendo en cuenta los descubrimientos científicos y las prioridades de las partes interesadas. El análisis de decisión multicriterio es una herramienta que ofrece un marco de decisión cuyo propósito es elegir entre alternativas en función de criterios múltiples y saber cuál de ellas es la óptima. El objetivo de este trabajo fue evaluar el impacto producido por variables cualitativas y cuantitativas sobre la calidad de distintos ambientes acuáticos de la ciudad de Salta para poder proponer un plan estratégico de gestión integrada del recurso. Se utilizó la metodología Utilidad Multiatributo mediante el software *Generic Multi-Attribute Analysis* (GMAA). Se consideraron cinco ambientes previamente monitoreados, divididos en estación seca y húmeda: Dique Campo Alegre y Ríos La Caldera, Vaqueros, Arenales Etapa Inicial y final obteniendo así un total de 10 alternativas. Se definieron dos grupos de atributos con sus respectivos sub-atributos: Impacto Ambiental (Descarga de efluentes e Índice de Calidad Ambiental) e Impacto social (Usos recreativos, Aceptabilidad del recurso e Impactos generales). Los resultados mostraron que a pesar de que algunas variables impactan más en un ambiente que en otro, todas son importantes a la hora de evaluar la calidad global del agua lo que tendrá influencia en las decisiones futuras para el manejo integrado de los recursos y la mejora en la calidad de vida de las personas.

Palabras clave: calidad de agua, toma de decisiones, utilidad multiatributo, plan estratégico.

ABSTRACT

Water-related issues are a concern worldwide regarding its quality, availability, access and uses. In order to assess water quality, systematic monitoring are carried out using different variables that must be within limit values established by legislation. Despite the importance of monitoring, data obtained are usually valuable for experts in the field, but of little importance for the population that put water quality and their health into risk. For global awareness, it would be feasible to apply methodologies that provide a comprehensive and easily to understand description, taking into account both scientific findings and stakeholders priorities. *Multicriteria Decision Analysis* (MCDA) is a tool that provides a framework decision whose purpose is to choose between different alternatives based on multiple criteria and know which one is the best. Thus, the aim of this work was to assess the impact caused by qualitative and quantitative variables on water quality of aquatic environments in Salta, Argentina that will allow proposing in the future a strategic plan for integrated resource management. Multi-attribute Utility methodology was applied through the software *Generic Multi-Attribute Analysis* (GMAA). Five aquatic environments previously monitored were selected and each of them considered in dry and wet seasons: Campo Alegre Reservoir, La Caldera, Vaqueros and Arenales Rivers, the latest divided into Initial and Final Stages, obtaining then 10 alternatives. Then, two sets of attributes with their respective sub-attributes were defined: Environmental Impact Assessment (Effluent discharges and Environmental Quality Index) and Social Impact (Recreational uses, Resource acceptability and General impacts). Results showed that although some variables influence most in one environment rather than in the other, all of them are important when assessing the overall quality of water. This will influence on future decision-making for the integrated management of resources and on the improvement of people's life quality.

1. INTRODUCCIÓN

El agua, un recurso vital para el ser humano y su desarrollo, ha despertado en los últimos tiempos grandes preocupaciones con respecto a su disponibilidad, acceso y usos [1]. Para el año 2025, se estima que el planeta necesitará un 17% más de agua para poder llevar a cabo la producción adicional de alimentos y a su vez el consumo total de agua aumentará en un 40% [2]. Adicionalmente, la falta de acceso al agua segura y el saneamiento deficiente en los países en desarrollo principalmente, son los causantes de aproximadamente el 80% de las enfermedades de origen hídrico. Se sabe que más de 1100 millones de personas carecen de acceso a un servicio mejorado de abastecimiento de agua y 2400 millones a sistemas mejorados de saneamiento. La proyección más alarmante indica que para el 2050 casi 7000 millones de personas sufrirán escasez de agua en 60 países. Uno de los grupos más vulnerables son los niños ya que unos 4 mil mueren cada día en todo el mundo a causa de la diarrea y de una consecuente deshidratación provocada por beber agua en mal estado [2].

Las principales causas de la contaminación del recurso son las aguas residuales domésticas y los residuos industriales volcados a los cursos de agua, como así también, las actividades recreativas, el uso de fertilizantes y pesticidas en agricultura, la intrusión de agua salada y la erosión del suelo que causan problemas en la salud humana y en la ecología de los ambientes acuáticos [3]. A pesar de que la protección de los recursos hídricos es una prioridad a nivel mundial, el aumento de la urbanización y los nuevos problemas ambientales hacen que esta protección sea cada vez más difícil de manejar [4]. Es importante señalar que la problemática no solo alcanza al sector de agua potable y recreativa sino que igual panorama se presenta en el caso del agua para la agricultura e industria. La producción de alimentos va en aumento debido al crecimiento poblacional, y lo mismo sucede para el caso del turismo, hidroenergía y navegación [2].

La provincia de Salta (noroeste de Argentina), en los últimos años sufrió un crecimiento demográfico exponencial e ininterrumpido, lo que trajo aparejado la expansión de la población a lugares donde los servicios básicos como agua y saneamiento no estaban disponibles [5]. Esto ha llevado a que las personas utilicen agua tanto para consumo como para recreación con un nivel de calidad inadecuado al punto de resultar peligroso para la salud.

Aquí yace la necesidad de aplicar una gestión innovadora que integre muchos aspectos importantes entre los que se pueden mencionar sociales, económicos, ambientales, políticos e institucionales, y todo esto con una visión a largo plazo [2]. La gestión integral de los recursos hídricos nace de la comprensión de que el agua es vital para la supervivencia, la salud y la dignidad humana y es un recurso fundamental para el desarrollo de la sociedad [2]. Para preservar el agua es necesario entonces, reconocer, estudiar y evaluar las amenazas (niveles y tipos de contaminantes), la vulnerabilidad (la protección natural del medio físico-biótico hacia el acuífero) y el riesgo de contaminación de los ambientes (integración de las amenazas y la vulnerabilidad) [6].

Con el objeto de evaluar dicha calidad, se realizan monitoreos en donde se miden diferentes variables que son indicadoras de algún tipo de contaminación. Sin embargo, estos datos son valiosos solo para la gente idónea, pero de poca importancia para las personas que son los que hacen uso y están en contacto con el recurso, poniendo en riesgo su salud y la del agua. La toma de decisiones para decretar zonas de conservación hídrica así como para la regulación de las actividades humanas que contaminan los acuíferos, necesita información científica que las fundamente, pero además requiere de una participación interdisciplinaria e inclusiva [6]. La gestión integrada justamente concibe que los usos de los recursos hídricos deban gestionarse en forma conjunta asegurando su uso sostenible a largo plazo y para futuras generaciones [2]. En consecuencia, se vuelve una necesidad la búsqueda y el uso de herramientas adecuadas que proporcionen una descripción general y de fácil comprensión de la situación que a su vez tenga en cuenta tanto los descubrimientos científicos como las prioridades de las partes interesadas.

Las metodologías multicriterio son herramientas de toma de decisiones cuyo principio plantea que la participación de la sociedad y la inclusión de sus consideraciones son tan importantes como la ciencia, la economía, los impactos ambientales, la seguridad, etc. [7]. Además, el punto central radica en que evolucionaron con el objeto de dar soluciones a la incapacidad de las personas de analizar múltiples y diferentes flujos de información. Por otro lado, resulta interesante aclarar que los métodos de decisión multicriterio no consideran la posibilidad de encontrar una única solución óptima sino que, en función de las preferencias del agente decisor y de objetivos pre-definidos (usualmente conflictivos), se encuentran con el problema de seleccionar la(s) "mejor"(es) alternativa(s), aceptar alternativas que parecen "buenas" y rechazar aquellas que parecen "malas" y generar un "ordenamiento" (ranking) de las alternativas consideradas (de la "mejor" a la "peor") [8]. En trabajos anteriores [9], se utilizó la metodología denominada Proceso Jerárquico Analítico (AHP, del inglés *Analytic Hierarchy Process*) desarrollada por Saaty [10] para evaluar los impactos que generan diferentes actividades en la calidad de ambientes acuáticos de la provincia de Salta, Argentina. AHP se eligió como estudio inicial porque corresponde a la metodología más trabajada

y con mayores antecedentes. El objetivo del presente trabajo fue seleccionar otra metodología de decisión multicriterio, en este caso la denominada Teoría de Utilidad Multiatributo (MAUT/MAVT del inglés *Multi-attribute utility theory/ Multiattribute value theory*) para evaluar los impactos causados tanto por variables cuantitativas como cualitativas sobre la calidad de los ambientes acuáticos previamente estudiados. De esta manera, se podrá saber si se llega o no a los mismos resultados que con el AHP, y/o se obtiene información complementaria para el análisis integrado de estos ambientes acuáticos para la posterior implementación de un plan estratégico de mejora de la calidad.

2. PARTE ANALÍTICA Y/O EXPERIMENTAL

2.1. Metodología multicriterio aplicada: Teoría de utilidad multiatributo (MAUT)

Para que cualquier proceso de toma de decisión pueda ser aplicado se deben seguir los siguientes pasos: se analiza la situación, se identifica el o los problemas y los aspectos relevantes que permitan evaluar las posibles soluciones, luego se identifica las posibles soluciones, se aplica un modelo de decisión para obtener un resultado global y, finalmente, se realiza el análisis de sensibilidad [10].

Como se mencionó al inicio, en este trabajo se seleccionó la metodología denominada Teoría de la Utilidad Multiatributo (MAUT) la cual consiste en la construcción de un medio para asociar números reales con cada alternativa analizada, basándose en un conjunto de atributos. De esta manera, se produce un orden de preferencia sobre ellas que será consistente con los juicios realizados por el tomador de decisiones. Para ello, el MAUT asume que en cada problema de decisión existe una función utilidad (U) que se presenta en forma aditiva o multiplicativa y se usa para transformar los atributos de cada alternativa en un único valor [11]. La alternativa con el mejor valor de utilidad se selecciona como la mejor. Al determinarse la utilidad de cada una de las alternativas se consigue un ordenamiento completo del conjunto finito de alternativas. El MAUT confía en que, quien toma las decisiones lo hace de manera racional (se prefiere la mayor utilidad sobre la menor), las preferencias no cambian y el decisor tiene conocimiento y es consistente con sus juicios [12]. El objetivo final es maximizar la función utilidad lo que hace de este modelo un proceso de optimización compensatorio. A su vez, este método permite abordar fluidamente cuestiones de incertidumbre y riesgo ya que la mayoría de problemas de decisión reales complejos incluyen incertidumbre, no pudiéndose entonces predecir con certeza las consecuencias o impactos de las alternativas de decisión bajo consideración. Para ello, se necesita un análisis formal ya que es imposible considerar las anteriores complejidades de forma informal en la mente [13].

En este caso en particular, el análisis MAUT se llevó a cabo mediante un software libre llamado *Generic Multi-Attribute Analysis* (GMAA) el cual se sustenta de la teoría de la Utilidad Multi-atributo [14]. Los fundamentos básicos de dicho software se corresponden con lo que el autor denomina el Análisis de Decisiones (AD) que tiene como objetivo estructurar y simplificar la toma de decisiones de situaciones complejas tanto como permita la naturaleza del problema [15]. El AD está desarrollado bajo la hipótesis de que las alternativas de decisión atraerán al decisor dependiendo de dos puntos importantes: las probabilidades de las posibles consecuencias de cada alternativa y las preferencias del decisor con respecto a las posibles consecuencias. Lo que hace único al AD es la forma en que se cuantifican estos factores y se incorporan de forma lógica al análisis del problema. Para cuantificar la probabilidad de un rango de consecuencias se utilizará toda la información disponible, los datos recopilados, modelos y opiniones profesionales.

Así, el AD que utiliza el GMAA se puede dividir en cinco etapas:

- 1) Estructuración del problema: incluye la construcción de una jerarquía de objetivos que representa el problema a analizar con todos sus aspectos relevantes y la especificación de atributos para los objetivos del nivel más bajo de dicha jerarquía. Esto permite determinar en qué grado satisfacen dichos objetivos las alternativas de decisión a evaluar.
- 2) Identificación de las alternativas de decisión que se van a analizar, sus impactos o consecuencias en términos de los atributos identificados en la etapa anterior y su incertidumbre asociada (si fuese necesario).
- 3) Cuantificación de las preferencias del decisor: implica calcular las utilidades individuales de los atributos del problema, las cuales representan las preferencias del decisor sobre los posibles valores en éstos, y cuantificar la importancia relativa de los objetivos a lo largo de la jerarquía a través de pesos.
- 4) Evaluación de las alternativas.
- 5) Análisis de Sensibilidad

2.2. Recopilación y selección de datos

En este trabajo se seleccionó la metodología multicriterio MAUT para poder evaluar el impacto de diferentes actividades en el deterioro de la calidad de diferentes ambientes acuáticos de la Provincia de Salta. Esto se definió como el Objetivo general (OG) para el MAUT.

2.2.1. Selección de atributos-Estructuración del problema

Para poder apreciar la situación de las alternativas mencionadas, se consideraron variables cualitativas y cuantitativas (que serán los atributos), previamente definidas y utilizadas con el AHP [16].

- Variables cualitativas: impactos por descarga de efluentes incluyendo dos sub-niveles de análisis: industriales y domésticos; usos recreativos, con dos sub-niveles: de contacto primario y secundario; aceptabilidad del recurso; impactos generales, con tres sub-niveles: lavado de objetos (autos, ropa, etc.), vida silvestre y presencia de basurales en las orillas.
- Variable cuantitativa: en este punto se utilizó un índice de calidad de aguas canadiense calculado anteriormente [17], que englobó 9 variables fisicoquímicas y microbiológicas.

Las variables corresponden a los objetivos de primer nivel que derivan del objetivo general, mientras los que se denominan “sub-niveles” son objetivos de segundo nivel que también serán nombrados como “atributos” (Figura 1) [18].

Para construir el árbol jerárquico en el GMAA (Figura 1), fue necesario un reordenamiento de los atributos. Se definieron entonces dos grupos de atributos con sus respectivos sub-atributos: Impacto Ambiental (Descarga de efluentes e Índice de Calidad Ambiental) e Impacto social (Usos recreativos, Aceptabilidad del recurso e Impactos generales) (Figura 1).

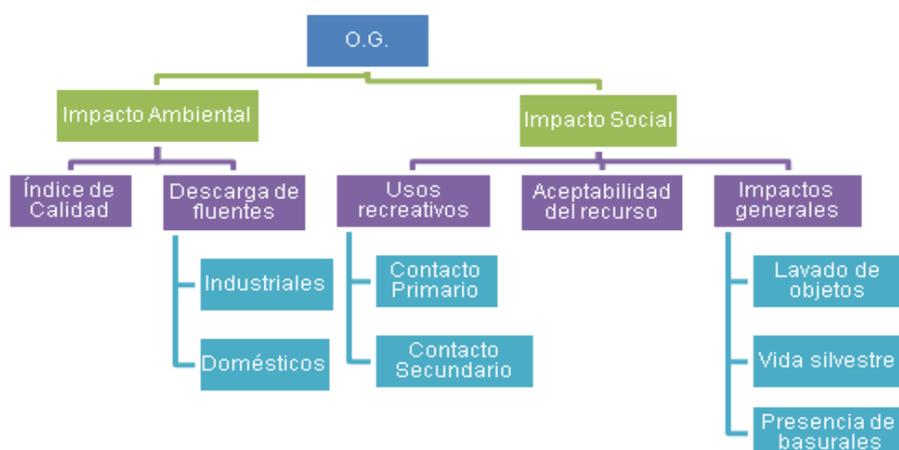


Figura 1: Árbol jerárquico de atributos

2.2.2. Identificación de las alternativas

Se seleccionaron como alternativas cinco ambientes acuáticos estudiados previamente [9] los cuales fueron divididos a su vez en estación seca (ES) y húmeda (EH). Estos ambientes fueron: Río Vaqueros, Río de la Caldera, Dique Campo Alegre y Río Arenales, este último dividido en dos: etapa final e inicial. De esta manera se consideraron para el análisis un total de 10 alternativas (Tabla 1).

Tabla 1: Nomenclatura para las 10 alternativas a analizar, a fin de facilitar la lectura y la carga en el software (ES: estación seca; EH: estación húmeda; EF: etapa final; EI: etapa inicial)

Nomenclatura	Alternativas
S1	Vaqueros ES
S2	Vaqueros EH
S3	Caldera ES
S4	Caldera EH
S5	Dique Campo Alegre ES
S6	Dique Campo Alegre EH
S7	Arenales EF-ES
S8	Arenales EF-EH
S9	Arenales EI-ES
S10	Arenales EI-EH

2.3. Cuantificación de las preferencias del decisor

Cuantificar las preferencias implica calcular las utilidades individuales de los atributos, que representan las preferencias del decisor sobre los posibles valores de éste y la importancia relativa de los objetivos de la jerarquía, a través de pesos. Ambos serán utilizados posteriormente para evaluar las alternativas bajo consideración a través de una función utilidad multiatributo aditiva (Ecuación (1)) la cual tiene la siguiente forma:

$$u(Sq) = \sum_{j=1}^n w_j u_j(x_j^q) \quad (1)$$

Donde w_j es el peso del atributo j -ésimo sobre la decisión, que se obtiene multiplicando los pesos de los nodos que hay en el camino desde el Objetivo Global (Overall Objective) o raíz de la jerarquía hasta el atributo en cuestión; x_j^q es la consecuencia de la alternativa S_q en el atributo j -ésimo y u_j es la utilidad asociada a la consecuencia anterior.

Este modelo multiatributo aditivo se utilizará para calcular por un lado, las utilidades globales medias de las distintas alternativas (en las que se basa la clasificación de alternativas) y, por otro, utilidades globales mínimas y máximas, que proporcionarán información útil sobre la robustez de la clasificación anterior. Las utilidades globales medias se obtienen tomando los puntos medios de los intervalos de consecuencias uniformemente distribuidos (x_j^q), el punto medio del intervalo de utilidades individuales asociado a dicho valor u_j y los pesos medios normalizados de los atributos sobre la decisión (w_j). Para obtener las utilidades globales mínimas (ó máximas), se toman como consecuencias los extremos inferiores (ó superiores) de los intervalos de consecuencias si las correspondientes funciones de utilidad en esos atributos son crecientes y los extremos superiores (ó inferiores) si son decrecientes; los extremos inferiores (ó superiores) de los intervalos de utilidad asociados a las consecuencias anteriores; y los extremos inferiores (ó superiores) de los intervalos de pesos normalizados de los atributos sobre la decisión [19].

Es importante aclarar que para este caso, a mayor utilidad menor será el impacto causado sobre la calidad del ambiente acuático en cuestión y una menor utilidad indicará un mayor impacto de los atributos considerados.

Para la inclusión de los pesos a lo largo del árbol de jerarquía fue necesario el uso de los pesos obtenidos durante la aplicación del AHP, el cual se llevó a cabo mediante el software *Expert Choice* [9]. Con respecto a esto, cabe aclarar que en todas las alternativas (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9 S10) el peso de los atributos es el mismo, ya que en el momento de ser cargados a lo largo del árbol de jerarquía, la carga se realiza de manera global para todos los ambientes.

Por otro lado, para la cuantificación de las utilidades, el GMAA permite cargarla de dos maneras diferentes: por un lado el construyendo la función utilidad lineal a trozos imprecisa (proporcionando hasta tres valores dentro del rango del atributo con sus correspondientes utilidades imprecisas o utilizando la combinación de varios métodos basados en loterías), asignando utilidades imprecisas para valores discretos del atributo; y por otro brinda una escala subjetiva en la que los valores se traducen a utilidades con valores comprendidos entre 0 (peor valor) y 1 (mejor valor) [20]. Se aprovechó esta ventaja y se cargaron todos los atributos cualitativos mediante el modo de carga subjetivo, mientras que el atributo cuantitativo (Índice de Calidad de Agua-ICA) fue incluido en el sistema por medio de la primera forma de carga correspondiente a la utilidad lineal a trozos.

Con la carga de los pesos, las utilidades, alternativas y atributos junto a sus objetivos de mayor nivel, se procedió a analizar los resultados brindados por el GMAA.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1. Evaluación de alternativas

De manera general, el GMAA proporciona un gráfico de barras en donde se representan las utilidades globales, las cuales corresponden a la sumatoria de todas las utilidades aportadas por cada uno de los atributos analizados para cada alternativa estudiada (Figura 2). La línea vertical amarilla representa la utilidad global media, mientras que los rectángulos horizontales rojos están limitados por las utilidades globales mínimas y máximas (Figura 2). En este caso el ambiente acuático que resultó menos impactado (es decir con mayores valores de utilidad), y por ende con mejor calidad fue el Río Vaqueros en estación seca (S1: Vaqueros ES, Figura 2), mientras que el más contaminado fue el Río Arenales en su etapa final en estación húmeda (S8: Arenales EF-EH, Figura 2).

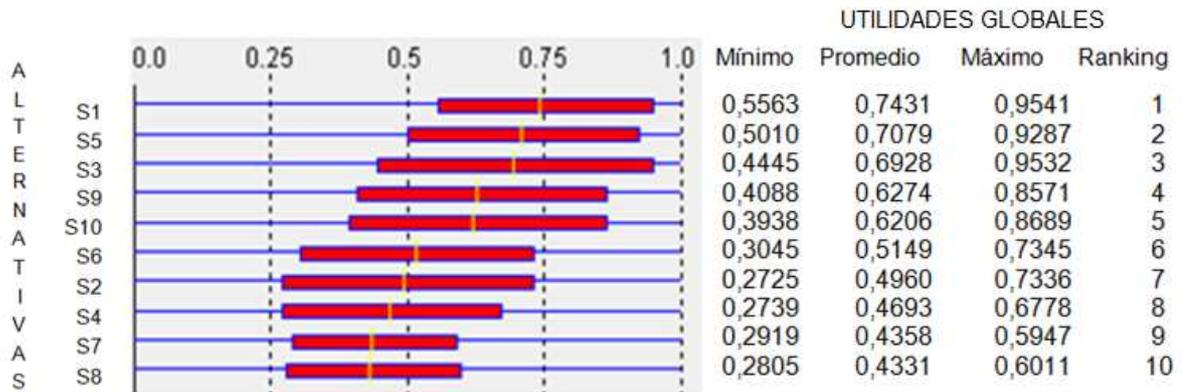


Figura 2: Clasificación de alternativas obtenidas según la simulación en el GMAA. S1: Vaqueros ES; S2: Vaqueros EH; S3: Caldera ES; S4: Caldera EH; S5: Dique Campo Alegre ES; S6: Dique Campo Alegre EH; S7: Arenales EF-ES; S8: Arenales EF-EH; S9: Arenales EI-ES; S10: Arenales EI-EH

El GMAA también facilita otros gráficos con información útil sobre la clasificación de las alternativas. Uno de ellos es la herramienta denominada “Clasificación de alternativas desglosada” que proporciona la contribución de las utilidades individuales de acuerdo a cada uno de los atributos sobre las utilidades globales medias (Figura 3). Cada alternativa tiene asociada una barra horizontal cuya longitud es proporcional a la utilidad global media (barra roja de la Figura 2). Cada uno de los colores representan a un atributo, de esta manera sus contribuciones conforman la barra que muestra la utilidad final media de cada ambiente acuático. No necesariamente todos los atributos están representados en estas barras ya que en algunos casos puede darse la circunstancia de que la consecuencia en algún atributo de una alternativa sea la menos preferida, teniendo utilidad cero y, por lo tanto, no tenga contribución alguna sobre la utilidad media global (Figura 3).

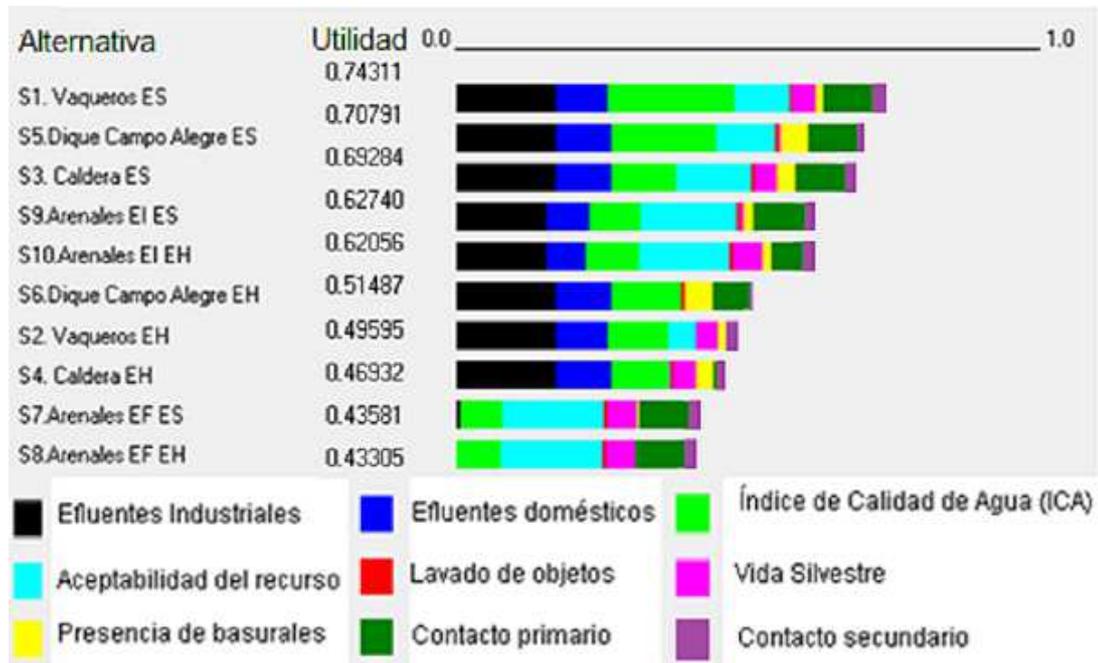


Figura 3: Clasificación de las alternativas desglosadas con respecto al Objetivo general. Los atributos Efluentes industriales y domésticos derivan de Descarga de efluentes; Contacto primario y secundario, se encuentran dentro de Usos recreativos; Lavado de objetos, Vida silvestre y Presencia de basurales en las orillas corresponden a Impactos generales.

Esta clasificación de alternativas desglosada permitió ver detalladamente el aporte de cada uno de los atributos sobre la utilidad global de cada una de ellas (Figura 3). Es sumamente interesante destacar que para las alternativas S7 y S8 correspondientes al Río Arenales Etapa Final tanto para la estación seca como para la húmeda el valor de la función utilidad para los atributos efluentes industriales y domésticos, como así también para la presencia de basurales, fueron cero o aproximadamente cero (Figura 3). Este resultado no es sorprendente ya que este río, en la zona

mencionada, es receptor durante todo el año de efluentes de industrias ubicadas a sus orillas como así también de la planta de tratamiento de efluentes líquidos, lo que explica la mala condición de sus aguas [21]. Además, es una zona que se encuentra rodeada de asentamientos, poblacionales ilegales, los cuales contribuyen también al aumento de basura en sus márgenes y a la constante degradación de su calidad. Contrario a esto, los restantes ambientes acuáticos presentaron valores de utilidades bastante altos y similares entre sí para estos atributos (Figura 3), lo cual es lógico, pues en estos ambientes acuáticos no se registran descargas de efluentes.

Para el caso de los ríos La Caldera EH y Vaqueros EH, los valores de utilidad para los atributos Impactos generales (Lavado de autos, Presencia de basurales y Vida silvestre) y Usos recreativos (tanto de Contacto primario como secundario) fueron muy bajos. Esto es debido a que en verano, ambos ríos son intensamente utilizados con fines recreativos [9], resultando un acontecimiento que incide directamente en su calidad.

Los tres ambientes que presentaron mayores valores de utilidad (menos contaminados), fueron los Ríos Vaqueros ES y La Caldera ES y el Dique Campo Alegre ES. Esto es esperable ya que durante la estación seca la concurrencia a espacios acuáticos es menor, casi nula, disminuyendo así los impactos causados por los atributos Usos recreativos e Impactos generales. Sin embargo, puede observarse que en el caso del Dique Campo Alegre ES el valor de utilidad en el sub-atributo Contacto secundario es mucho menor que en los otros dos ambientes. Esto se debe a que en este ambiente las actividades de contacto secundario son frecuentes tanto en la estación seca como en la húmeda [9].

3.2. Análisis de sensibilidad

La mayoría de los problemas que involucran toma de decisiones son complejos por lo que la información obtenida a través de las utilidades globales no es suficiente como para sugerir si una dada alternativa (en este caso un ambiente acuático) resulta con mayor o menor utilidad (menor o mayor impacto sobre su calidad, respectivamente). Es decir, se obtienen intervalos de utilidad global muy solapados (Figura 2). Con "solapados" se refiere a rangos de utilidades para las alternativas que abarcan los mismos intervalos de valores para las combinaciones de pesos posibles. Para hacer frente a esta situación, el GMAA propone dos herramientas para realizar un análisis de sensibilidad: el "cálculo de las alternativas no dominadas y potencialmente óptimas" y/o el uso de técnicas de simulación Montecarlo [22]. Estas proporcionan información más concluyente y se puede llevar a cabo un proceso iterativo de reducción de la imprecisión de los parámetros del problema (utilidades individuales, consecuencias y pesos) y la reevaluación de alternativas con alguno de los análisis de sensibilidad, como los indicados anteriormente, hasta que se alcance una alternativa dominante [20]. Este tipo de análisis de sensibilidad intenta sacar provecho de toda la información imprecisa asociada a los parámetros del problema, obtenida a través de la cuantificación de las preferencias del decisor y de la identificación de las consecuencias de las alternativas.

3.2.1. Análisis de sensibilidad: Variables no dominadas y potencialmente óptimas

Esta herramienta permite identificar las alternativas que son no dominadas y las que son potencialmente óptimas. Las alternativas no dominadas son aquellas tales que no existe ninguna otra que para cualquier combinación de consecuencias, pesos y utilidades individuales (obtenidos de los correspondientes intervalos) tenga siempre mayor utilidad que ella; mientras que una alternativa es potencialmente óptima si existe alguna combinación de consecuencias, pesos y utilidades individuales para las cuales dicha alternativa es clasificada como la mejor, es decir, que proporciona la mayor utilidad global. El estudio se centró en aquellas alternativas que, además de ser no dominadas, son potencialmente óptimas, eliminando del análisis las restantes [23].

Para conocer cuáles de los diez ambientes acuáticos aquí evaluados cumplían con ser alternativas no dominadas y potencialmente óptimas, el software resuelve un proceso de optimización sobre las funciones utilidad de las alternativas [24] y [25] (Ecuación (1)).

El programa, en primer lugar realiza el análisis de dominancia, mediante una correlación entre las alternativas, indicando la dominancia de una alternativa sobre otra (Tabla 2). Si el valor del coeficiente es mayor a cero, significa que la alternativa que se encuentra en la columna domina a la alternativa de la fila correspondiente a la casilla que las intersecta (donde se encuentra dicho coeficiente) y ya no es necesario mirar si esta última (la ubicada en la fila) está dominada por alguna otra (Tabla 2). Esto, como es de suponer, significa que dichas alternativas ya no se incluyen en el análisis de potencialidad óptima, pues al ser dominadas, no pueden ser potencialmente óptimas frente a las otras alternativas.

Luego del análisis de dominancia, el sistema, mediante otro proceso de optimización, realiza el análisis de potencialidad óptima. Para este caso en particular, se obtuvo que siete (S1, S10, S2, S3, S5, S6 y S9; Tabla 1) de los diez ambientes acuáticos estudiados cumplían con la condición

de ser no dominadas y a la vez potencialmente óptimas, quedando afuera tres (S7: Río Arenales Etapa Final ES, S8: Río Arenales Etapa Final EH y S4: Río La Caldera EH). Estos resultados indican que el impacto ocasionado sobre la calidad de estos tres ambientes es tal que, a pesar de que se redujeran los valores (dentro de los intervalos posibles de probabilidad) de cualquiera de los atributos, no podrán nunca tomar un lugar óptimo de calidad, ni dejarán de estar dominados por las demás alternativas.

Puede notarse (Tabla 2) que S1, S5, S3, S9, S10; S6 y S2 presentan valores negativos. El signo negativo significa que esas alternativas son no dominadas entre sí, mientras que el sentido de los valores numéricos radica en el siguiente razonamiento: el Dique Campo Alegre ES (S5), es capaz de ser en un 0,2171 más óptimo que el Río Vaqueros ES (S1), mientras que el Río Vaqueros EH (S2), puede llegar a ser solo en un 0,032 más óptimo que El Río Vaqueros ES (S1). Así puede analizarse rápidamente, cómo se relacionan las alternativas y en qué grado pueden alcanzar mayores niveles de utilidad que los demás ambientes en juego.

Tabla 2: Análisis de dominancia y potencialidad óptima para los ambientes acuáticos bajo estudio: S1: Vaqueros ES; S2: Vaqueros EH; S3: Caldera ES; S4: Caldera EH; S5: Dique Campo Alegre ES; S6: Dique Campo Alegre EH; S7: Arenales EF-ES; S8: Arenales EF-EH; S9: Arenales EI-ES; S10: Arenales EI-EH. Las alternativas aparecen tanto en la primera fila como en la columna. El orden en el que aparecen de mayor a menor según el orden en que aparecen en la clasificación de alternativas (Figura 1). S8 no aparece en la columna, al igual que S1 no está en la fila por el hecho que se hace una comparación de a pares y las alternativas no se comparan entre sí, en este análisis.

	S5	S3	S9	S10	S6	S2	S4	S7	S8
S1	-0,2171	-0,2326	-0,1572	-0,1542	-0,0412	-0,032	0,0133	0,0412	0,0357
S5		-0,2955	-0,2158	-0,2248	-0,0896	-0,1016			
S3			-0,2801	-0,2814	-0,1711	-0,1638			
S9				-0,3346	-0,2277	-0,2275			
S10					-0,2512	-0,2330			
S6						-0,3279			
S2									
S4									
S7									

3.2.2. Análisis de sensibilidad: Simulación Montecarlo

Este tipo de análisis de sensibilidad permite cambiar de forma automática los pesos de los atributos sobre la decisión, generando resultados que pueden ser analizados estadísticamente para obtener información útil sobre la recomendación final de una alternativa como la mejor o la peor [26]. La base del método es generar de forma aleatoria combinaciones de pesos para los atributos del problema que darán lugar a distintas clasificaciones de alternativas. Para ello el sistema utiliza un generador de números aleatorios congruencial multiplicativo lineal basado en el método de Schrage [19]. El generador proporciona una secuencia virtualmente infinita de números estadísticamente independientes distribuidos de forma uniforme en el intervalo [0, 1].

El sistema de simulación cuenta con tres técnicas distintas basadas en simulación Montecarlo: Pesos totalmente aleatorios, Orden de importancia de los atributos y Pesos imprecisos explicitados. El primero es un caso extremo donde los pesos de los atributos sobre la decisión se pueden generar de forma totalmente aleatoria lo que implica que hay un desconocimiento absoluto sobre la importancia relativa de los atributos del problema y los resultados obtenidos serán probablemente menos esclarecedores que en las otras dos técnicas de simulación. La segunda tiene en cuenta un ordenamiento total o parcial de los atributos del problema por orden de importancia, así los pesos se generan de forma aleatoria pero luego se asignan a los atributos del problema teniendo en cuenta el orden de importancia proporcionado por el decisor. Mientras que la tercera técnica de simulación aprovecha información que se puede haber introducido en la carga de pesos de los atributos (depende del nivel de información certera que posee el decisor en el momento de la carga). En este trabajo se eligieron los dos primeros como herramienta de análisis: el de pesos completamente aleatorios (cuando no se cuenta con información alguna) y el orden de ponderación de atributos, (cuando es posible establecer un orden de importancia de atributos) a fin de comparar ambos resultados. Para el segundo caso, se realizó dicha jerarquización de los atributos de mayor a menor importancia (Tabla 3) la cual no fue seleccionada al azar sino que se basó en resultados obtenidos tanto en este trabajo (Figura 2) como en los que se realizaron anteriormente [9].

Tabla 3: Orden de importancia de atributos en donde 1 es el más importante y 9 el menos.

Sub-atributos	Atributos
1) Índice de Calidad de Agua	
2) Efluentes Industriales	Descarga de efluentes
3) Efluentes Domésticos	
4) Aceptabilidad del recurso	
5) Presencia de Basurales	Impactos generales
6) Lavado de objetos	
7) Vida Silvestre	
8) Contacto Primario	Usos recreativos
9) Contacto Secundario	

De acuerdo a los atributos y su orden de importancia (Tabla 3), la simulación Montecarlo brinda un ranking del 1 al 10 para clasificar las alternativas (ambientes acuáticos) en donde 1 indica que un ambiente es el mejor posicionado con respecto a su calidad y 10 indica la peor situación (menos calidad). Con respecto a este ranking, el simulador asigna para cada alternativa tanto un valor "mínimo" como uno "máximo". El mínimo indica su calidad actual (presentada en la Figura 2) mientras que el máximo indica hasta qué valor puede alterarse o ser impactado (negativamente) dicha calidad, es decir, hasta qué posición de baja utilidad (mayor puesto en el ranking) puede tomar.

Utilizando la opción "Pesos completamente aleatorios", se observó que todos los ambientes presentarían calidad adecuada ya que pueden adquirir valores mínimos en el ranking entre 1 y 3. Sin embargo, también se debe analizar la peor clasificación correspondiente a cada alternativa. Es importante destacar que al Río Vaqueros en la estación seca (S1), se le asignó un valor de 1 en el ranking mínimo indicando una mayor calidad en esa época del año. Sin embargo, se observó que dicho ambiente puede posicionarse en algún momento, en un valor de 9 en el ranking, es decir un nivel de calidad muy bajo y como consecuencia altamente preocupante. Esto significa que cuando se establezcan planes de vigilancia ambiental en este ambiente, aunque la época seca pareciera ser la mejor con respecto a la calidad (o sea la que necesitaría menos control), según los resultados establecidos en el ranking, los tomadores de decisiones tendrán que estar atentos ante cualquier cambio o alerta que ocurra durante esta época del año que pueda tener influencia directa en su calidad y por consiguiente en la población. Los resultados obtenidos para los restantes ambientes fueron similares a S1, excepto para El Río La Caldera en la estación seca (S3, Tabla 5). A este ambiente se le asignó un valor de 1 en el ranking mínimo de calidad y 6 en el máximo. Esto lo hace el ambiente con mejor calidad y que además no necesitaría tanto control durante todo el año sino más bien durante la estación húmeda (S4) en donde el rango es más pronunciado (Tabla 5).

Tabla 4: Simulación Montecarlo-Comparación S1: Vaqueros ES; S2: Vaqueros EH; S3: Caldera ES; S4: Caldera EH; S5: Dique Campo Alegre ES; S6: Dique Campo Alegre EH; S7: Arenales EF-ES; S8: Arenales EF-EH; S9: Arenales EI-ES; S10: Arenales EI-EH

Alternativas	Pesos totalmente aleatorios						Ordenamiento de Pesos				
	Ranking		Percentil			Ranking		Percentil			
	Min.	Max.	25	50	75	Min.	Max.	25	50	75	
S1	1	9	2	3	4	1	3	1	2	2	
S2	3	10	8	9	10	5	9	8	8	8	
S3	1	6	1	2	2	1	4	3	3	3	
S4	2	10	6	7	9	5	8	7	7	7	
S5	1	9	2	3	6	1	3	1	1	2	
S6	2	10	6	8	10	3	7	4	4	6	
S7	1	10	5	7	9	8	10	9	9	9	
S8	2	10	6	8	10	9	10	10	10	10	
S9	1	10	3	5	6	4	8	5	6	6	
S10	1	8	3	4	5	4	8	4	5	6	

Sin embargo, estos resultados no son de fiar ya que el método de pesos totalmente aleatorios, como su nombre lo indica, la asignación es aleatoria, no tiene ninguna información fehaciente de

estos ambientes. Estas deducciones son importantes para tener en cuenta, ya que no hay ningún tipo de certeza sobre los impactos que pueden llegar a recibir los ambientes en un futuro.

A pesar de que resulte relevante la consideración de los valores anteriores, por comportamientos históricos, existe la posibilidad de sesgar estos valores de manera de obtener derivaciones más significativas. Así, se procede a analizar los resultados obtenidos a partir de la segunda técnica de Montecarlo: el Ordenamiento de los pesos. Ésta otorgó un ranking completamente distinto al anterior y con mayor sentido con respecto a lo que se conoce. Los ambientes acuáticos posicionados como los de mejor calidad con respecto al ranking inferior fueron solamente tres: S1, S3 y S5 que corresponden al Río Vaqueros, Río La Caldera y el Dique Campo Alegre todos en la estación seca. A su vez los peores valores que se les asignaron a estos ambientes con respecto a su calidad fueron 3, 4 y 3 respectivamente (Tabla 5). Esto indica entonces que estos tres ambientes durante la estación seca presentan una calidad adecuada y no será necesario realizar un monitoreo y control de la calidad tan intenso comparado con la estación húmeda. Contrario a esto, los ambientes que obtuvieron los números más altos en el ranking (menor calidad) tanto mínimo como máximo fueron S7 y S8 (Arenales en Etapa Final en estación seca y húmeda) (Tabla 5). Esto indicaría que el impacto que sufre este ambiente por actividades de distinta índole es constante lo que obliga a realizar una vigilancia ambiental durante ambas estaciones.

4. CONCLUSIONES

El concepto de gestión integrada implica que la toma de decisiones sea participativa ya que los diferentes grupos de usuarios pueden tener influencia en las estrategias, en el desarrollo y gestión del recurso hídrico. Los usuarios locales informados pueden regular mejor la conservación del agua y protección de sitios de captación con una gestión centralizada y sectorial. Aquí radica la importancia y los fundamentos del tipo de metodología utilizada en el presente trabajo, pues mediante la teoría de Utilidad Multiatributo, es posible incluir distintos tipos de variables de incumbencia global y representativa.

De la información obtenida es importante remarcar que existe una marcada diferencia en los valores de función utilidad entre las estaciones seca y húmeda principalmente en aquellos ambientes que presentan intensos usos recreativos. La calidad se ve desmejorada meramente por el impacto de estas actividades por lo que será de gran importancia considerarlas como un punto crucial a la hora de proponer una gestión integrada y estratégica de los ambientes.

Por otro lado, resulta importante aclarar que la aplicación del programa y el análisis de sensibilidad que entrega, estima las posibilidades de niveles de calidad que pueden llegar a tomar las alternativas en un futuro, ya que el sistema brinda resultados luego de 10000 simulaciones, donde se realizan todas las posibles combinaciones de pesos de impactos o atributos para cada una de las alternativas. Esto significa que el nivel de información con respecto al impacto ocasionado por diferentes variables sobre la calidad de los ambientes acuáticos bajo estudio es muy importante a la hora de tomar medidas para el manejo, el cuidado y la vigilancia de los ambientes, resultando un estudio para la toma de conocimiento de las condiciones en las cuales se presentan los ambientes acuáticos seleccionados.

A partir de estos resultados se podrá utilizar la información socavada de la situación actual que servirá para implementar un plan estratégico que permita el manejo responsable y la toma de conciencia del cuidado de los ambientes acuáticos estudiados. En consecuencia, el estudio de simulación resulta una base conceptual para la creación de políticas ambientales, estrategias de gestión e implementación útiles para alcanzar un mayor nivel de calidad de vida de las personas y del recurso acuático.

5. REFERENCIAS

- [1] Prospectiva hídrica, Instituto Nacional del Agua, Argentina, 2010
- [2] Diagnóstico y marco estratégico para la gestión integrada de la cuenca del Río Nanay, Loreto; Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (IIAP), 2009.
- [3] FAO/UN-Water, Food and Agriculture Organization of the United Nations (2006). *Water Monitoring. Mapping Existing Global Systems and Initiatives*. FAO on behalf of the UN-Water Task Force on Monitoring, Stockholm.FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations (2006). Global Outlook, data, however, refers to the year 2000. Prepared by the Statistics Division.
- [4] Islam N, Sadiq R, Rodríguez MJ, Francisque A (2013). Evaluation of source water protection strategies: a fuzzy-based model. *J Environ Manage*; doi: 10.1016/j.jenvman.2013.02.022.
- [5] Rajal VB, Cruz C, Last JA (2010). Water quality issues and infant diarrhoea in a South American province. *Glob Public Health*; 5(4):348-363

- [6] Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental-Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional Unidad Mérida (2009), *Seminario: análisis de la vulnerabilidad y riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la península de Yucatán*
- [7] Igor Linkov, Emily Moberg (2012) *Multi-Criteria Decision Analysis: Environmental Applications and Case Studies*, USA, Taylor Francis Group.
- [8] Barredo Cano, J. I., 1996, *Sistemas de Información Geográfica y evaluación multi-criterio en la ordenación del territorio*. Madrid.
- [9] Gutiérrez-Cacciabue D, Teich I, Poma H.R, Cruz MC, Balzarini M, Rajal VB, 2014. Strategies to optimize monitoring schemes of recreational waters from Salta, Argentina: a multivariate approach. *Environ Monitor Assess*; 186(12):8359-8380
- [10] Thomas L. Saaty (2012). *Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in Complex World*. USA. Tercera Edición. RWS Publications
- [11] Munda et al., 1994
- [12] Kiker (2008), *Integrating Comparative Risk Assessment with Multi-Criteria Decision Analysis to Manage Contaminated sediments: An Example for the New York/New Jersey Harbor*. *Human and Ecological Risk Assessment* 14(3): 495-511
- [13] Jiménez, A. (2002), *Un Sistema de Ayuda a la Decisión Multiatributo con Asignaciones Imprecisas*, Tesis Doctoral. Dpto. de Inteligencia Artificial, Facultad de Informática, Universidad Politécnica de Madrid.
- [14] Ríos-Insua S., Gallego E., Jiménez A., Mateos A. (2006), *A Multi-Attribute Decision Support System for Selecting Environmental Intervention Strategies*, *Ecological Modelling* 196, 1-2, pp. 195-208
- [15] Belton, Valerie, Stewart, Theodor (2002). *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. USA. Segunda Edición. Kluwer Academic Publishers.
- [16] Gutiérrez Cacciabue D, Poma HR, Rajal VB (2013). *Calidad de ambientes acuáticos de la Provincia de Salta: Análisis Multicriterio para la toma de decisiones*. XXIV Congreso Nacional del Agua (CONAGUA). San Juan, Argentina.
- [17] Gutiérrez Cacciabue, D (2013). *Resistencia y persistencia de organismos patógenos en ambientes acuáticos de la Provincia de Salta-Sistemas para la mitigación y el control de la contaminación*. Tesis Doctoral. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta. Argentina.
- [18] Brownlow y Watson (1987) *Structuring Multi-Attribute Value Hierarchies*. *The Journal of the Operational Research Society* 38:4,309-317.
- [19] Jiménez, A., Ríos-Insua, S., Mateos **GENERIC MULTI-ATTRIBUTE ANALYSIS : UN SISTEMA DE AYUDA A LA DECISIÓN**, A. Departamento de Inteligencia Artificial, Facultad de Informática, Universidad Politécnica de Madrid
- [20] Antonio Jiménez, Sixto Ríos-Insua y Alfonso Mateos **ANÁLISIS MULTIATRIBUTO GENÉRICO (AMG)**, Manual de Usuario, Departamento de Inteligencia Artificial, Universidad Politécnica de Madrid, Campus de Montegancedo S/N, 28660, Boadilla del Monte, Madrid, España
- [21] Poma HR, Gutiérrez-Cacciabue D, Garcé B, Gonzo EE, Rajal VB, 2012a. *Towards a rational strategy for monitoring microbiological quality of ambient waters*. *Sci Total Environ*, 433:98-109
- [22] Jiménez A., Ríos-Insua S. and Mateos A.: *Monte-Carlo Simulation Techniques in a Multi-Attribute Decision Support System*, *Proceedings of the 12th IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling*, M.H. Hamza (ed.), ACTA Press, ISBN 0-88986-384-9, 2003, pp. 85-90.
- [23] Mateos, A., Jiménez, A. y Ríos-Insua, S. (2003), "Solving Dominance and Potential Optimality in Imprecise Multi-Attribute Additive Problems", *Journal of Reliability Engineering and System Safety* 79, 2, pp. 253-262.
- [24] Ríos Insua, D. (1990), *Sensitivity Analysis Multi-objective Decision Making*, LNEMS 347, Springer. Berlín.
- [25] Ríos Insua, D. y French, S. (1991), "A Framework for Sensitivity Analysis in Discrete Multi-Objective Decision-Making", *European Journal of Operational Research* 54, 176-190.
- [26] Jiménez, A., Ríos-Insua, S. y Mateos, A. (2003), "A Decisión Support System for Multiattribute Utility Evaluation based on Imprecise Assignments", *Decision Support Systems*

Agradecimientos

Este estudio se enmarcó dentro del Proyecto de Investigación Plurianual (PIP), periodo 2013-2015: "Calidad del agua en la Provincia de Salta. Evaluación de la situación y propuestas", bajo la dirección de la Dra. Verónica Rajal. Macarena Abdenur Araos se encuentra realizando su proyecto final para obtener el título de Ingeniera Industrial y posee una beca Estímulo a las Vocaciones Científicas (EVC, 2014- 2015) otorgada por el Consejo Interuniversitario Nacional (CIN). La Dra. Dolores Gutiérrez Cacciabue es becaria posdoctoral del INIQUI-CONICET.