



OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO APLICADA A LA ELECCIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA EN MISIÓN NUEVA POMPEYA, CHACO

DR. ING. JORGE V. PILAR – MG. ING. ALEJANDRO A. RUBERTO – ING. MARCELO J. GÓMEZ
Fac. Ccs. Económicas, UNNE – Dto. de Hidráulica, Fac. de Ingeniería, UNNE
jvpilar@gmail.com – aleruberto44@yahoo.com.ar – mgichaco@yahoo.com.ar

RESUMEN

Se presenta el abordaje utilizado para encontrar la mejor ubicación de la planta de tratamiento de agua en Misión Nueva Pompeya, provincia del Chaco, en el Impenetrable Chaqueño, de manera tal de minimizar los impactos negativos provocados por su construcción y operación.

Para ello se formuló un modelo de apoyo a la decisión, entendible, basado en una técnica de optimización multiojetivo, incorporando una variante de “relajamiento difuso”, basado en la lógica difusa.

Se utilizaron atributos cualitativos, como riesgo sanitario, molestias ocasionadas a la población, costos y otros, que se relacionan con cuestiones técnicas vinculadas con la operación y los procesos que realiza la planta en el tratamiento. En este caso, se tuvieron en cuenta aspectos sociales, ambientales, económicos y técnicos.

Palabras Clave: Apoyo Multicriterio a la Decisión (MCDM); Minimización de Impactos; Relajamiento Difuso.

1. INTRODUCCIÓN

La ciudad de Nueva Pompeya se localiza en el Impenetrable Chaqueño, sobre la ruta provincial N°9, en el Departamento Güemes, a 190km de Juan José Castelli, cabecera de ese Departamento. Cuenta con una población de poco más de 5.000 habitantes, a la que se suma una población periurbana de algo más de 1.500 habitantes, totalizando alrededor de 6.500 personas.

Actualmente, su fuente de provisión de agua es el río Bermejito, que pasa al este de la ciudad. Sin embargo, este río presenta problemas estacionales e interanuales de calidad y cantidad.

Por ello, la empresa SAMEEP (empresa del Gobierno del Chaco, proveedora de servicios de agua potable y cloacas) decidió la construcción de un sistema de distribución de agua potable, con financiamiento de un PRÉSTAMO BIRF (2013) que se abastecería con un acueducto desde el río Teuco. Ese acueducto transportará agua no tratada y la potabilización se realizará en una planta que se construirá en la ciudad o sus inmediaciones (Figura N°1).

La provisión de agua de buena calidad y en abundante cantidad es, sin dudas, beneficiosa para cualquier población. Sin embargo la construcción y operación de las obras implican impactos ambientales y sociales no deseados.

La localización de la planta de tratamiento (potabilización) es una de las cuestiones que más fricciones genera. Por ello, el desafío consistía en buscar una ubicación que minimizara los impactos negativos, teniendo en cuenta que ninguna de las alternativas de emplazamiento posibles se mostraba ni absolutamente mejor, ni absolutamente peor que las otras. Utilizando el léxico propio de la Teoría de la Decisión, ninguna constituyó una solución dominante o dominada, según el criterio de Pareto.



Elegir una sola opción entre varias posibles y teniendo en cuenta varios criterios simultáneamente es, además de una tarea difícil, una fuente de potenciales conflictos. Este tipo de situaciones viene siendo estudiado en las últimas décadas por la Investigación de Operaciones, y las técnicas desarrolladas para abordar estos problemas son conocidas como “Técnicas de análisis multiobjetivo” (Barbosa, 1997; Cohon, 1978; Pilar, 2003). Ellas son una importante herramienta de apoyo a la decisión, en especial en cuestiones de interés público.



Figura N°1. Ubicación de Nueva Pompeya [Fuente: GoogleEarth].

Los conceptos y definiciones asociados a la optimización multiobjetivo, acertados o equivocados, intentan objetivar de alguna manera el subjetivo proceso de decisión, rompiendo con el mito de la decisión óptima en el más puro y abstracto sentido matemático. Algunos autores definen a estos métodos como una tercera alternativa a la eterna dicotomía entre pragmatismo y purismo (Barredo Cano, 1996).

Para abordar el problema de escoger el sitio de emplazamiento de la planta de tratamiento para abastecer de agua potable a la ciudad de Nueva Pompeya se aplicó la técnica de optimización multiobjetivo conocida como “Método de Análisis Jerárquico”, desarrollado por Saaty (Saaty, 1991), con una variante de “relajamiento difuso”, propuesta por Pilar (2003), que aplica conceptos de lógica difusa (fuzzy logic).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Método del Análisis Jerárquico

Cuando en un proceso decisorio varias alternativas están siendo consideradas por una persona o grupo de personas, ellos, en principio, estarán tratando de: (a) desarrollar un juicio sobre la importancia relativa de estas alternativas; (b) tratar de que su juicio final sea lo más objetivo posible.

Una analogía válida es suponer que estos juicios son, de alguna manera, el resultado de comparar medidas físicas muy precisas, como por ejemplo “pesos”. Comparar (“pesar”) al mismo tiempo todas las alternativas entre sí es una tarea



prácticamente imposible. Pero sí es posible realizar comparaciones “paritarias” entre ellas, es decir de a dos por vez.

Si el resultado de estas comparaciones se vuelca en una matriz, se tendrá algo semejante a lo indicado en la Figura N°2.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow A = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix}$$

Figura N°2. Matrices de comparaciones paritarias entre alternativas.

En la matriz de la izquierda de la Figura N°2, “ a_{12} ” representa la importancia relativa entre la alternativa “1” y la “2” (peso de 1, “ w_1 ”, dividido por el peso de 2, “ w_2 ”). Por tal motivo, la matriz “A” será recíproca, es decir que lo que está por arriba de la diagonal principal será recíproco de lo que se encuentra por debajo de la misma.

No sería esperable que tal ecuacionamiento sea hecho cada vez que se vaya a tomar una decisión, trascendente o no, o emitir un juicio de valor. Sin embargo, si se espera que el juicio sea ecuánime, el proceso de decisión no debería alejarse mucho de esto.

Continuando con el razonamiento, considérese la línea “i” de la matriz de la derecha de la Figura N°2: a_{i1} ; a_{i2} ; ... ; a_{ij} ; ... ; a_{in} . Si se multiplica el primer elemento de esa línea por “ w_1 ”, el segundo por “ w_2 ”, y así en más, se tendrá:

$$\frac{w_i}{w_1} \cdot w_1 = w_i \quad \frac{w_i}{w_2} \cdot w_2 = w_i \dots \dots \frac{w_i}{w_j} \cdot w_j = w_i \dots \dots \frac{w_i}{w_n} \cdot w_n = w_i \quad (1)$$

Si esto mismo se hiciera con los juicios reales (ya no con los ideales), se obtendría una línea (vector línea), cuyos elementos representarían la dispersión estadística del juicio elaborado sobre el valor de “ w_i ”. Luego, sería válido utilizar como estimativa de “ w_i ” al promedio de estos valores (Saaty, 1991).

$$\text{Caso ideal:} \quad w_i = a_{ij} \cdot w_j \quad (\text{para } i \text{ y } j \text{ variando de } 1 \text{ hasta } n) \quad (2)$$

$$\text{Caso más real:} \quad w_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot w_j \quad (3)$$

Entonces, suponiendo que se tenga una matriz “A”, formada por juicios (comparaciones) “precisos” y otra matriz “A’”, que sea una estimativa aproximada de “A”, se podrá escribir lo siguiente:

$$A' \cdot W = \lambda_{\text{MAX}} \cdot W \quad (4)$$

Se puede demostrar que, en el caso de que la “A’” sea una matriz consistente, o sea con juicios o ponderaciones coherentes, la (4) tiene solución única y en ella “ λ_{MAX} ”



es el mayor autovalor de " A' ", mientras que " w " es su autovector. Este autovector será el "vector de prioridades" de las alternativas o criterios que se están analizando.

Es posible demostrar que, cuanto más parecido sea " λ_{MAX} " al número de alternativas que están siendo comparadas (n), más consistente será el juicio de valor que se elaboró (matriz A'). Se puede demostrar, también, que siempre será $\lambda_{MAX} \geq n$. El método prevé mecanismos para verificar la consistencia de las comparaciones paritarias.

2.2. El "relajamiento difuso"

Cada vez que los tomadores de decisiones deben llenar las matrices de comparaciones paritarias, se percibe en ellos cierta incomodidad al momento de tener que asignar un puntaje preciso y de preferencia entero a esas comparaciones, especialmente cuando se trataba de los criterios de decisión. Para intentar resolver esta suerte de conflicto, Pilar (2003) propuso el artificio de "relajar" esta puntuación, haciendo uso de algunas nociones de la lógica difusa.

La lógica difusa utiliza el concepto de "grado de membresía", que indica la seguridad o certeza que se tiene respecto a que un elemento pertenezca a un conjunto. La lógica difusa admite la pertenencia parcial a un conjunto, a diferencia de lo propuesto por la lógica booleana, lo que la hace especialmente interesante, pues permite incorporar el análisis de sensibilidad al propio proceso de toma de decisión (Pilar, 2012).

Otro concepto interesante de la lógica difusa es el de "número difuso", que se utiliza para caracterizar un dato subjetivo y que no debe ser entendido como una variable aleatoria: es una estimativa y no una medida.

Pilar propuso que cuando se realizan las comparaciones paritarias, al estimarse la relación " a_{ij} ", que define el peso relativo que el decisor atribuye al elemento " i " sobre el " j ", en caso que dicho valor sea mayor que la unidad, el mismo podría variar de un valor " n ", con un grado de membresía máximo, hasta " $n-1$ " y " $n+1$ " (la variabilidad de 1, en más o en menos, es sólo indicativa, pudiendo adoptar cualquier otro valor), con grados de membresía nulos en ambos casos. En caso de ser menor que la unidad, podría variar entre " $1/n$ ", con grado de membresía máximo, hasta " $1/(n+1)$ " y " $1/(n-1)$ ", como límites inferior y superior, respectivamente, y con grados de membresía nulos (Figura N°3).

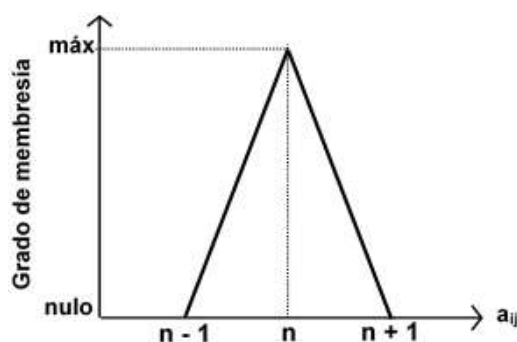


Figura N°3. Caracterización difusa de la relación " a_{ij} "

Entonces, siguiendo este razonamiento, las matrices de comparaciones paritarias podrían tener tres valores por celda: uno correspondiente al grado de membresía más probable (sin que ello implique una caracterización probabilística) y los dos restantes, uno superior y otro inferior, con grados de membresía nulos.



Luego, siguiendo el procedimiento del Método del Análisis Jerárquico, se deberían calcular tres autovectores: uno para las comparaciones con grado de membresía máximo, otro para los valores que representan los límites superiores de estas comparaciones (grado de membresía nulo) y el restante para los valores que representan los límites inferiores de las comparaciones (también con grado de membresía nulo).

3. ELECCIÓN DEL SITIO DE EMPLAZAMIENTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

Para aplicar el Método del Análisis Jerárquico al problema de decidir la localización de la planta de tratamiento de agua se consideraron 4 aspectos:

- a) social (que tiene en cuenta el riesgo sanitario y las molestias a la población);
- b) ambiental (que considera el desmonte, la modificación del paisaje, la alteración de los suelos y de la morfología del terreno);
- c) dificultades técnicas (en lo que se refiere al tratamiento del agua y la disposición final de los lodos residuales), y
- d) económico.

Es importante que estos aspectos reflejen la problemática sin redundancias, es decir, deben ser, en la medida de lo posible, independientes. (En otro caso, inclusive en este mismo caso, diferentes analistas podrán escoger otros aspectos a ser tenidos en consideración.)

El resultado de la comparación paritaria primaria (sin relajamiento difuso) entre esos aspectos es mostrado en la Figura N°4. Hecho el correspondiente análisis de consistencia, se verificó que los juicios representados en esta matriz fueron coherentes.

	Aspectos sociales	Aspectos ambientales	Aspectos técnicos	Aspectos económicos
Aspectos sociales	1,00	3,00	3,00	5,00
Aspectos ambientales	0,33	1,00	1,00	1,67
Aspectos técnicos	0,33	1,00	1,00	1,67
Aspectos económicos	0,20	0,60	0,60	1,00
Sumatoria	1,87	5,60	5,60	9,34
1/Sumatoria	0,53	0,18	0,18	0,11
Valor normalizado	0,53	0,18	0,18	0,11

Figura N°4. Comparaciones paritarias entre los aspectos considerados.

La línea inferior de la matriz de la Figura N°4 es el vector de prioridades, que refleja la preferencia de los decisores: el aspecto “social” representa 53% de su decisión, el aspecto “ambiental” 18%, las cuestiones “técnicas” también 18% y las “económicas” 11%.



Hay que destacar que la utilización de una escala de 1 a 9 es una propuesta justificada por el propio Saaty al presentar su método (Saaty, 1991).

Posteriormente, a la matriz de la Figura N°4 se le aplicó el “relajamiento difuso” explicado en párrafos anteriores. En la Figura N°5 se muestra un gráfico con los resultados finales de esas comparaciones.

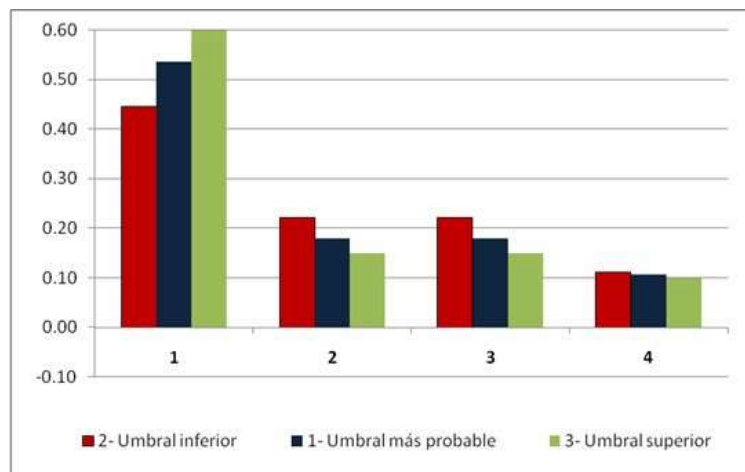


Figura N°5. Resultado final de las comparaciones paritarias, incluido el relajamiento “difuso”.

Se evaluaron tres opciones de localización de la planta de tratamiento de agua (ver Figura N°6):

- 1) Alternativa 1: planta sobre la Ruta Provincial N° 9;
- 2) Alternativa 2: planta en la ciudad y
- 3) Alternativa 3: planta cercana al río Bermejito.



Figura N°6. Alternativas de localización de la planta de tratamiento [Fuente: Google Earth 2011]

Siguiendo con el Método del Análisis Jerárquico, las tres alternativas se compararon entre sí, en forma paritaria, según cada uno de los cuatro aspectos considerados y utilizando la misma escala (de 1 a 9) que la usada en la comparación



mostrada en la Figura N°4. Con ello se obtuvieron cuatro nuevos autovectores, que representan las preferencias de cada una de las tres alternativas de ubicación, según los cuatro aspectos considerados.

En la Figura N°7 se presentan las comparaciones antes mencionadas entre las tres alternativas de localización evaluadas.

Comparaciones según aspectos sociales			
	Alt 1	Alt 2	Alt 3
Alt 1	1	5	2
Alt 2	0,2	1	0,4
Alt 3	0,5	2,5	1
Σ	1,7	8,5	3,4
$1/\Sigma$	0,59	0,12	0,29

Comparaciones según aspectos ambientales			
	Alt 1	Alt 2	Alt 3
Alt 1	1	5	2
Alt 2	0,2	1	0,4
Alt 3	0,5	2,5	1
Σ	1,7	8,5	3,4
$1/\Sigma$	0,59	0,12	0,29

Comparaciones según aspectos técnicos			
	Alt 1	Alt 2	Alt 3
Alt 1	1	0,33	0,17
Alt 2	3	1	0,50
Alt 3	6	2	1
Σ	10	3,33	1,67
$1/\Sigma$	0,10	0,30	0,60

Comparaciones según aspectos económicos			
	Alt 1	Alt 2	Alt 3
Alt 1	1	3	3
Alt 2	0,33	1	1
Alt 3	0,33	1	1
Σ	1,67	5	5
$1/\Sigma$	0,60	0,20	0,20

Figura N°7. Comparaciones entre las tres alternativas de localización analizadas.

Finalmente, fue preciso integrar todos los juicios (los cuatro autovectores de los últimos renglones de las matrices de la Figura N°7) para hacer una valoración final de estas alternativas. Entonces, se conformó con ellos una nueva matriz, la que se multiplicó por el vector de preferencias obtenido de la Figura N°4 (última línea de esta figura) y por los otros dos vectores que surgieron del “relajamiento difuso” de la matriz presentada en esa misma figura.

Localización	Resultados			
	Umbral inferior	Valor más probable	Umbral superior	Ranking
Planta sobre la Ruta	0,48	0,51	0,52	1°
Planta en la ciudad	0,17	0,16	0,16	3°
Planta cercana al río	0,35	0,34	0,33	2°

Figura N°8. Orden de preferencia de las alternativas de localización analizadas.

Como resultado se obtuvieron tres vectores (Figura N°8), que representan la preferencia de los decisores por cada una de las alternativas: uno correspondiente a la puntuación que en el contexto de este trabajo se denominó “más probable”, y los otros



dos correspondiendo a los umbrales “superior” e “inferior” del relajamiento “difuso” de la matriz presentada en la Figura N°4.

Elo permitió clasificar a las alternativas de localización de la planta de tratamiento según un orden de mérito o “ranking” (Figura N°8), resultando la localización junto a la Ruta Provincial N° 9 la que obtuvo el primer lugar en el orden de prioridad.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La aplicación de una técnica de optimización multiobjetivo permitió dar un poco de objetividad al proceso decisorio de elegir una entre tres alternativas de localización de la planta de tratamiento para abastecer de agua potable a la ciudad de Nueva Pompeya, según varios criterios, siendo que a priori ninguna de esas alternativas se mostraba ni mejor ni peor que las otras.

Según las ponderaciones efectuadas, la alternativa de localización junto a la Ruta Provincial N° 9 sería la que minimizaría los impactos negativos que provocarían la construcción y operación de la planta.

Se utilizó el “Método del Análisis Jerárquico”, de sólida base matemática y lógica, adoptando una variante de “relajamiento difuso” de las puntuaciones.

Sería deseable aprovechar la buena aceptación que mostró entre los tomadores de decisiones políticas este tipo de abordaje, para aplicarlo a otras situaciones conflictivas, con lo cual se podría ganar en objetividad a la hora de tomar decisiones trascendentes, especialmente en cuestiones de interés público.

4. REFERENCIAS

- Barbosa, P.S.F. (1997). “O emprego da análise multiobjetivo no gerenciamento dos recursos hídricos”. *Água em revista*. n8, pp 42-46.
- Barredo Cano, J.I. (1996). “Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio”. Madrid: RA-MA. 264p.
- Cohon, J.L. (1991). “Multiobjective programming and planning”. New York: Academic Press. 333p.
- PRESTAMO BIRF 7992/OC-AR. LINEA DE BASE AMBIENTAL. (2013). Programa de infraestructura hídrica del Norte Grande - Agua Potable y Drenajes Urbanos. “Proyecto de Abastecimiento de Agua Potable a las localidades de Wichi-El Sauzal-Misión Nueva Pompeya y Fuerte Esperanza”. Provincia del Chaco.
- Pilar, J.V. (2003). “Utilización de un modelo de apoyo a la decisión con relajación “difusa” para la elección de la traza de una defensa para el Gran Resistencia”. In: Encuentro nacional de docentes de investigación operativa, 16, [e] ESCUELA DE PERFECCIONAMIENTO EM INVESTIGACIÓN OPERATIVA, 14., La Plata. Anales.
- Pilar, J.V. (2012). “Herramientas para la gestión y la toma de decisiones” (2da. Ed.). Salta: Editorial Hanne. 138p.
- Saaty, T. (1991). “Método de análise hierárquica”. São Paulo: McGraw-Hill, Makron. 367p.