

OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO PARA LA ELECCIÓN DE LA MEJOR UBICACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE UN ACUEDUCTO EN MISIÓN NUEVA POMPEYA - CHACO

RUBERTO Alejandro R. (*), PILAR, Jorge V. (*), GÓMEZ Marcelo Justo M. (*)

Departamento de Hidráulica – Facultad de Ingeniería - UNNE

(*) Grupo de Investigación del Departamento de Hidráulica

Av. Las Heras 727 (CPA H3500COI). TE: 362 - 4420076. Interno 142

Correo-e: aruberto@ing.unne.edu.ar; marcelogomez@ing.unne.edu.ar; jpilar@ing.unne.edu.ar.

RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio realizado para encontrar la mejor ubicación de la planta de tratamiento de agua en Misión Nueva Pompeya, 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 la decisión, entendible, basado en una técnica de optimización multiobjetivo, incorporando una variante de “relajamiento difuso”, basado en la lógica difusa.

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

El abordaje multiobjetivo suele ser hecho utilizando polinómicas (generalmente sumas ponderadas), que incluyen de forma no siempre bien explicada los aspectos considerados relevantes.

La metodología que se utilizó en este trabajo buscó minimizar las valoraciones subjetivas.

Palabras clave: minimización de impactos, optimización multiobjetivo, relajamiento difuso, agua potable.

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 5.045 habitantes, a la que se suma una población periurbana de 1.562 habitantes, totalizando 6.607 habitantes.

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, 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).

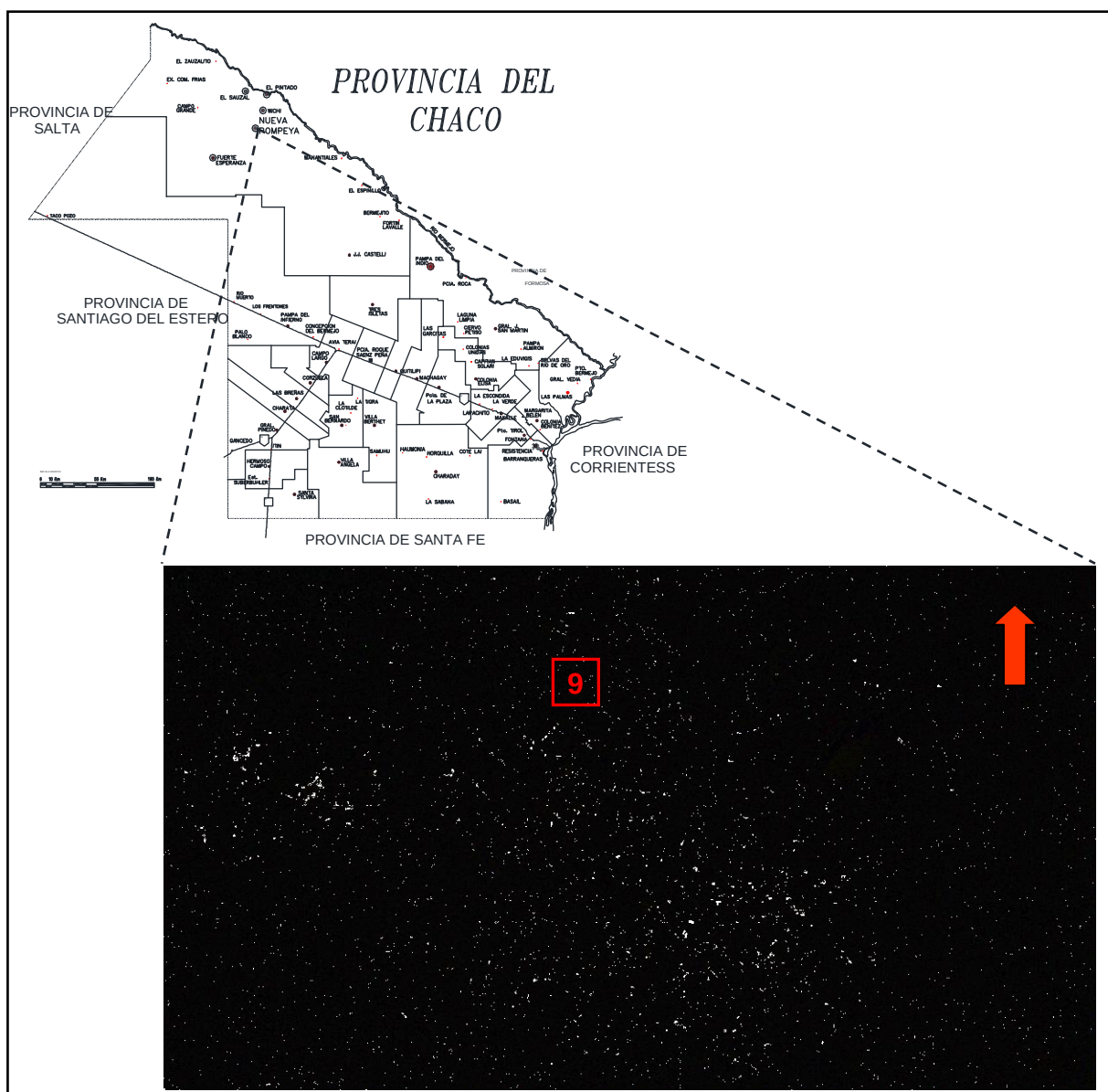


Figura N°1. Ubicación e imagen satelital de Nueva Pompeya y alrededores - Fuente: google earth 2011.

La provisión de agua de buena calidad y en abundante cantidad es ciertamente beneficiosa para cualquier población. Sin embargo la construcción y funcionamiento de las obras traen aparejados impactos ambientales, sociales y económicos, además de problemas de tipo técnico 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; Eppen et al, 2000; Pilar, 2003). Ellas son una importante herramienta de apoyo a la decisión, en especial en cuestiones de interés público.

La formulación objetiva de un problema de toma de decisión es complicada por la imprecisión e incertidumbre inherentes, que crean un ambiente no siempre claro para el decisor. 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 un acueducto que abastezca 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).

MATERIALES Y MÉTODOS

- Método del Análisis Jerárquico

Este método se basa en el hecho que cuando en un proceso decisorio varias alternativas están siendo consideradas por una persona o grupo de personas, en principio estarán tratando de:

- desarrollar un juicio sobre la importancia relativa de estas alternativas;
- 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.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Figura N°2. Matriz de las comparaciones paritarias entre alternativas

En la matriz “A” de la Figura N°2, “ a_{12} ” representa la importancia relativa entre la alternativa “1” y la “2”. Por tal motivo, esta 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. En la analogía de los pesos y suponiendo que la alternativa “1” pese, por ejemplo, $w_1 = 50g$ y la “2”, $w_2 = 40g$ se tendrá:

$$a_{12} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{50g}{40g} = \frac{5}{4} \quad (1)$$

Si en la matriz “A” cada elemento “ a_{ij} ” es reemplazado por una relación semejante a la indicada en (1) se tendrá una matriz como la mostrada en la Figura N°3.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{W_1}{W_1} & \frac{W_1}{W_2} & \dots & \frac{W_1}{W_n} \\ \frac{W_2}{W_1} & \frac{W_2}{W_2} & \dots & \frac{W_2}{W_n} \\ \frac{W_3}{W_1} & \frac{W_3}{W_2} & \dots & \frac{W_3}{W_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{W_n}{W_1} & \frac{W_n}{W_2} & \dots & \frac{W_n}{W_n} \end{bmatrix}$$

Figura N°3. Interpretación de la matriz de comparaciones paritarias

No sería esperable que un ecuacionamiento semejante 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 ecuaníme, el proceso de decisión no debería alejarse mucho de esto.

Continuando con el razonamiento, considérese la línea “i” de la matriz “A” mostrada en 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:

$$\frac{W_i}{W_1} \cdot W_1 = W_i \quad \frac{W_i}{W_2} \cdot W_2 = W_i \quad \dots \quad \frac{W_i}{W_j} \cdot W_j = W_i \quad \dots \quad \frac{W_i}{W_n} \cdot W_n = W_i \quad (2)$$

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, parece válido utilizar como estimativa de “ w_i ” al **promedio** de estos valores (Saaty, 1991).

$$\text{Caso ideal:} \quad w_i = a_{ij} \cdot w_j \quad (\text{para } i \text{ y } j \text{ variando de } 1 \text{ hasta } n) \quad (3)$$

$$\text{Caso más real:} \quad w_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot w_j \quad (4)$$

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:

$$A' \cdot w = \lambda_{MAX} \cdot w \quad (5)$$

Se puede demostrar que, en el caso de que la “A’ ” sea una matriz consistente, o sea con juicios o ponderaciones coherentes, la (5) 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 que se están analizando, según el criterio utilizado en la elaboración de las comparaciones.

Es posible percibir 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’).

Además, se puede demostrar que siempre será $\lambda_{MAX} \geq n$. El método prevé mecanismos para verificar la consistencia de las comparaciones paritarias.

- El “relajamiento difuso”

Cada vez que los tomadores de decisiones deben llenar las matrices de comparaciones paritarias, se puede percibir que ellos no se sienten muy cómodos al tener que asignar un puntaje preciso y de preferencia entero a esas comparaciones.

Para intentar resolver este 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. En la teoría clásica de conjuntos, un elemento pertenece o no a un conjunto dado; la lógica difusa admite la pertenencia parcial, lo que la hace especialmente interesante para 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”, 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°4).

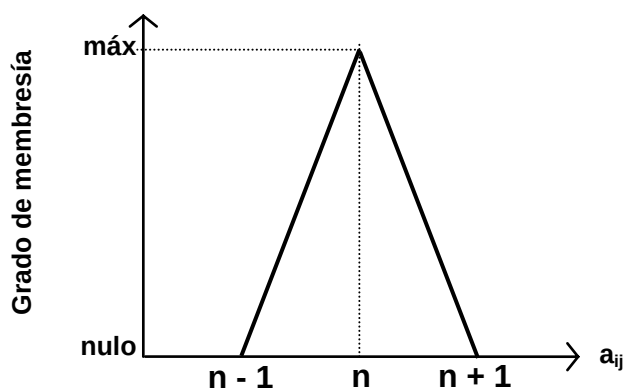


Figura N°4. Caracterización difusa de la relación “ a_{ij} ”

Entonces, siguiendo este razonamiento, las matrices de comparaciones paritarias podrían tener tres valores por celda: uno correspondiente al grado de membresía máximo 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).

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);
- 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°5. 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°5. Comparaciones paritarias entre los aspectos que fueron considerados

La línea inferior de la matriz de la Figura N°5 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%.

La utilización de una escala de 1 a 9 se debe al hecho que nuestro cerebro es capaz de reconocer hasta 9 niveles de “matices” en una comparación simultánea (Saaty, 1991).

Posteriormente, a la matriz de la Figura N°4 se la aplicó el “relajamiento difuso” explicado en párrafos anteriores. En la Figura N°6 se muestra en una gráfica con los resultados finales de esas comparaciones.

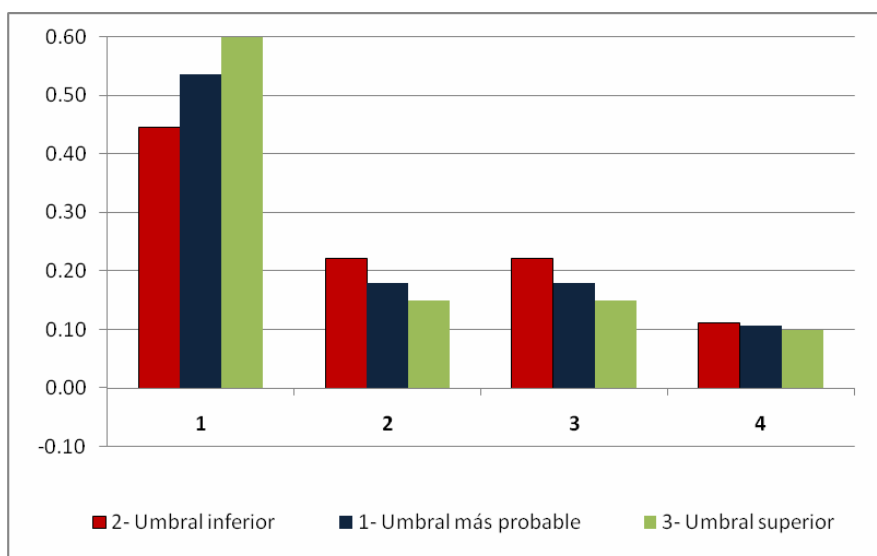


Figura N°6. Resultado final de las comparaciones paritarias, incluido el relajamiento “difuso”.

Se evaluaron tres alternativas de localización (ver Figura N°7):

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

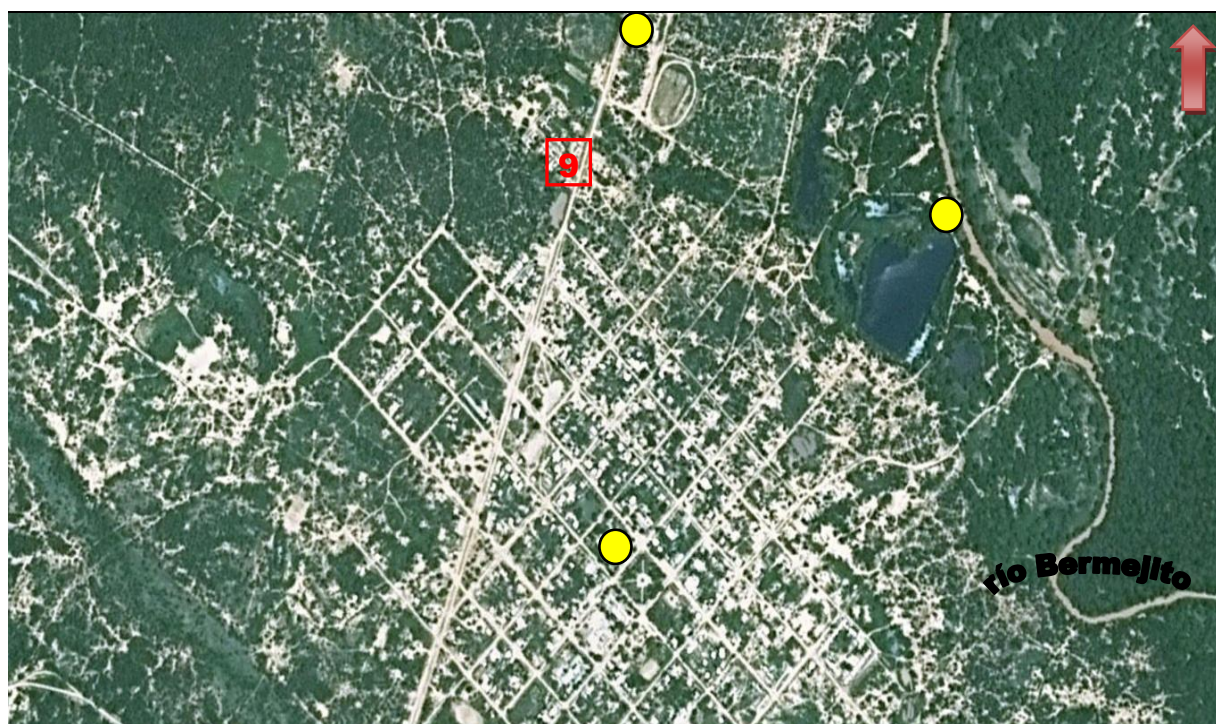


Figura N°7. Alternativas de localización en Misiones Nueva Pompeya

Siguiendo en 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 en la comparación mostrada en la Figura N°5. 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°8 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°8. 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°8) 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°5 (última línea de esta figura) y por los otros dos vectores que surgieron del “relajamiento difuso” de la matriz presentada en esa misma figura.

Como resultado se obtuvieron tres vectores (Figura N°9), 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.

Ello permitió clasificar a las alternativas de localización de la planta de tratamiento según un orden de mérito o “ranking” (Figura N°9). La localización junto a la Ruta Provincial N° 9 obtuvo el primer orden de prioridad.

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°9. Orden de preferencia de las alternativas de localización analizadas

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, siendo que a priori ninguna de estas 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 este tipo de abordaje, es decir la utilización de técnicas de optimización multiobjetivo, 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.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- Eppen, G.D., Gould, F.J., Schmidt, C.P., Moore, J.H., Weatherford, L.R.** (2000). *Investigación de operaciones en la ciencia administrativa*. México: Prentice-Hall. 792p.
- 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.