



XXXI ENDIO  
XXIX EPIO



UNIVERSIDAD NACIONAL  
de MAR DEL PLATA  
\*\*\*\*\*

---

## EL ANÁLISIS MULTICRITERIO COMO HERRAMIENTA DE APOYO A LA SELECCIÓN DE FUENTE DE ABASTECIMIENTO DE AGUA EN EL CHACO PARAGUAYO

Pilar, Jorge V.<sup>(1-2)</sup>; Ruberto, Alejandro R.<sup>(1)</sup>; Gómez, Marcelo J. M.<sup>(1)</sup> y Tymkiw, Pedro T.<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Grupo de investigación del Departamento de Hidráulica – Facultad de Ingeniería – UNNE

<sup>(2)</sup> Facultad de Ciencias Económicas – UNNE

*jvpilar@gmail.com – aleruberto44@yahoo.com.ar – mgichaco@yahoo.com.ar - pedro\_tymkiw@yahoo.com.ar*

### RESUMEN

En este trabajo se presenta el abordaje utilizado para elegir la mejor fuente de abastecimiento de agua para consumo humano en una región del Chaco Paraguayo. Para ello se formuló un modelo de apoyo la decisión, entendible, bajo el paradigma multicriterio, que minimiza los impactos económicos y ambientales.

Se utilizaron atributos de ponderación, como ubicación de la fuente, distancia de transporte, costos, y aspectos técnicos relacionados con la captación, toma y almacenamiento, para escoger la mejor fuente de abastecimiento de agua, de manera de dar una respuesta optimizante a varios objetivos, simultáneamente.

El modelo desarrollado se basó en la "Programación de Compromiso" y el "Método de Análisis Jerárquico". Para este caso, se consideró que deberían tenerse en cuenta, mínimamente, aspectos sociales, ambientales, económicos y técnicos.

Para considerar los aspectos sociales, se utilizó la cantidad de días por año que estadísticamente no podría lograrse una oferta de agua razonable. Para los aspectos ambientales, se consideraron la vegetación afectada, impactos en los suelos y sus usos, modificación del paisaje y accesibilidad. Entre los aspectos económicos se tuvieron en cuenta los costos de las alternativas, mientras que los aspectos técnicos contemplaron la captación, dificultad de operación y mantenimiento, dificultad de distribución, almacenamiento y transporte de agua.

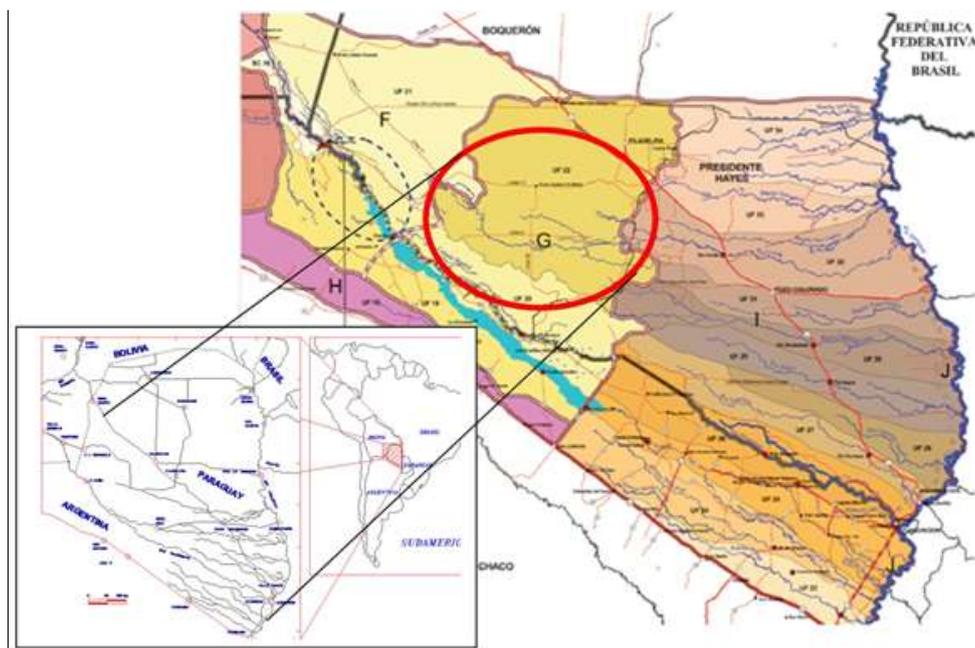
**Palabras Clave:** ANÁLISIS MULTICRITERIO; AGUA POTABLE; CONSUMO HUMANO; CHACO PARAGUAYO.



## 1. INTRODUCCIÓN

La región del Chaco Paraguayo o Gran Chaco Paraguayo se localiza entre las serranías del pedemonte, al oeste, el río Paraguay al este, Argentina al sur y Bolivia al norte (Figura 1).

Los cursos fluviales de la zona tienen poca capacidad de conducción debido a la baja energía de relieve, que combinada con la escasa pluviometría, configuran los comúnmente conocidos “sistemas hidrológicos no típicos” (SHNT) (Fertonani y Prendes, 1984), muy propios de la región chaqueña.



**Figura 1.** Ubicación continental y regional (fuentes: estudios Saltzgitter y Plan Gestión Integrada Cuenca del Río Pilcomayo).

Se caracteriza por tener un clima semihúmedo a semiárido, con un periodo húmedo entre octubre y abril. En esta zona se registran lluvias de 800 a 1.400 mm/año y condiciones subtropicales típicas; hacia el noroeste disminuyen las lluvias estacionales en el orden de 400 a 500 mm/año, imponiéndose un régimen subhúmedo a semiárido.

La evapotranspiración potencial excede a la precipitación en más de 50%, fenómeno causado por elevadas temperaturas (Harder, 2009).

Más de 80% del Chaco Paraguayo se caracteriza por la escasez de agua como consecuencia del balance hídrico negativo, agravada por la irregular distribución de las lluvias durante el año (Ruberto et al., 2013).

Hacia el oeste el clima es más seco, lo que ofrece condiciones naturales difíciles para la población humana. Sin embargo, en la parte central del Chaco Paraguayo hay poblaciones muy pujantes, en las que coexisten colonias menonitas, de elevada calidad de vida, basada en una economía cooperativa fuerte, junto con comunidades aborígenes, sin actividades económicas notables, más latinoparaguayos y otros grupos



humanos.

Según Monte Domeq (2007), “la disponibilidad de agua potable en el Chaco Central muestra la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento de agua, puesto que el mismo depende del volumen y frecuencia de lluvias y la capacidad de almacenamiento de las mismas, por parte de las comunidades”.

La mayor parte del agua superficial aprovechada en el Chaco Central proviene de las lluvias, acumulada en depresiones naturales, represas y en aljibes, siendo común el uso del agua cruda sin tratamiento. En todo el Chaco Central, particularmente en las comunidades aborígenes, la calidad de agua conlleva riesgos de salud, siendo frecuentes las enfermedades de origen hídrico (Tymkiw, 2010).

Actualmente, la región es un polo de producción láctea y de otros productos, como maní y carne. Para consolidar el desarrollo actual y permitir un crecimiento sostenido y sostenible, la provisión de agua de buena calidad y en cantidad suficiente es un factor determinante y decisivo.

Por ello, una misión técnica del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) fue comisionada por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) para analizar la problemática del agua, dentro del marco de la solicitud de cooperación realizada por Paraguay al Gobierno de España, que le otorgó un fondo no reintegrable de 50 millones de dólares estadounidenses.

En ese contexto, se analizaron las condiciones de abastecimiento actuales y se plantearon escenarios de crecimiento futuro, tomando como base una dotación de 160 l/hab/día, un valor consensuado con las autoridades de Paraguay y acorde con los usos y costumbres de los pobladores.

Para atender esa demanda se analizaron cuatro alternativas: a) acueducto desde el río Paraguay; b) “cosecha de agua”; c) techos y aljibes; y c) pozos someros con infiltración.

La alternativa a) consiste en un acueducto que tomaría agua en el río Paraguay y, luego de tratada, la transportaría por algo más de 200km, atravesando una zona sin poblaciones intermedias, lo que es un problema de operación y mantenimiento de la obra.

La b) está constituida por superficies de terreno acondicionadas como cuencas de captación, en campos, de las pocas precipitaciones que recibe la región.

La alternativa “techos y aljibes”, la c), consiste en captación de agua de lluvia en techos de viviendas y construcciones anexas como tinglados y superficiales de áreas urbanas y sus correspondientes aljibes.

Por su parte, la alternativa d), pozos someros con infiltración consiste en dejar almacenar agua en pozos de poca profundidad (someros) conectados con acuíferos, también someros, hacia los cuales se pueda dejar infiltrar agua proveniente de las precipitaciones.

Como puede notarse, todas las alternativas tienen puntos a favor y otros en contra, por lo que la elección de una de ellas se transformó en una tarea compleja y engorrosa. Utilizando el léxico propio de la Teoría de la Decisión, ninguna constituía una solución dominante o dominada, según el criterio de Pareto (Pilar, 2012).

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 y su solución 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/Multicriterio” (Barbosa, 1997; Cohon, 1991; Eppen et al, 2000). Ellas son una importante herramienta de apoyo a la decisión, en especial en cuestiones de interés público.



Para abordar el problema de seleccionar una alternativa de abastecimiento de agua para la región del Chaco Paraguayo se desarrolló una metodología que combina dos técnicas de análisis multicriterio, según una variante de la propuesta presentada por Pilar (2005). Esas técnicas son la Programación de Compromiso y el Método del Análisis Jerárquico.

## 2. LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Primeramente, fue necesario escoger los aspectos relevantes para la solución del problema y que, en forma esquemática, podrían ser llamados, simplemente, aspecto A, aspecto B y aspecto C (el número de aspectos relevantes no es una limitación del método).

Como los aspectos analizados pueden ser muy diferentes es necesario adoptar algún esquema para poder compararlos en una misma métrica. Se utilizó un esquema de "umbrales de indiferencia", según la metodología presentada por Pilar (2005). Se decidió asignar una puntuación 1 a la peor situación y 10 a la mejor.

De esta manera, el espacio de decisión queda restringido a un cuadrado, cubo o hipercubo de 9 unidades de arista (10 menos 1). En el caso de los 3 aspectos hipotéticos considerados, se estaría ante la presencia de un cubo.

En realidad, ese espacio sólo será un cubo en el caso en que cada aspecto tuviese la misma importancia relativa (peso) en la decisión. Sin embargo, cada aspecto podría tener una importancia diferenciada:  $w_A$ ,  $w_B$  y  $w_C$ , pero cumpliendo que  $w_A + w_B + w_C = 1$ .

Por lo tanto, el cubo hipotético se transformará en un poliedro, pues las coordenadas de cada eje deberían ser afectadas por los coeficientes mencionados en el párrafo anterior (Figura 2).

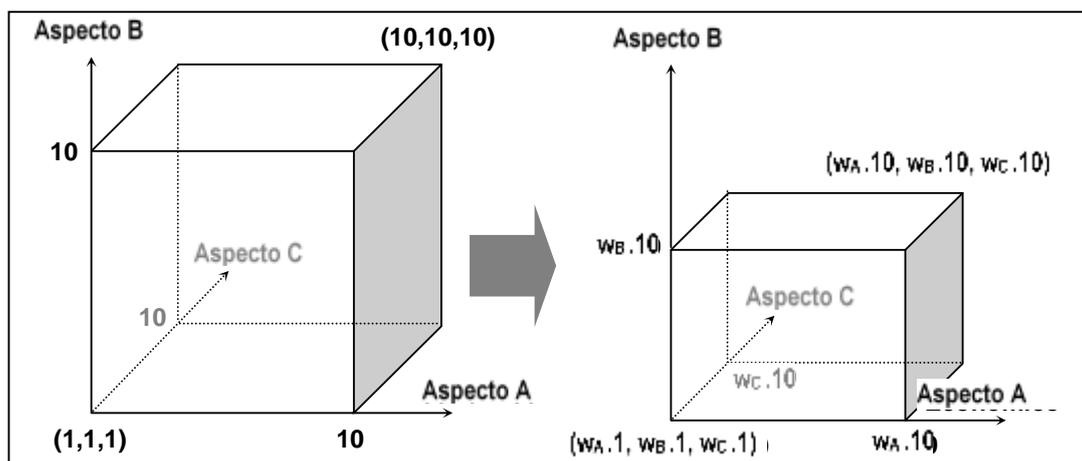


Figura 2. Deformación del espacio de decisión

Luego, utilizando la Programación de Compromiso, cada alternativa podría ser caracterizada por su distancia (euclídeana) al punto ideal (10, 10, 10), o por la distancia al punto antiideal (1, 1, 1). La mejor alternativa sería aquella que estuviese más cerca del punto ideal, o más lejos del antiideal, o ambas cosas.



Para este caso real y concreto, referido a la provisión de agua en la región del Chaco Paraguayo, los aspectos que se tuvieron en cuenta fueron cuatro: a) social; b) económico; c) ambiental y d) técnico.

Para caracterizar el aspecto social se calculó el porcentaje del tiempo que la dotación sería menor o igual a 65 l/hab/día (tomando como base los estudios hidrológicos que se realizaron al efecto y que escapan al alcance de este trabajo). Se adoptó como situación “Nota 10” aquella en la que este porcentaje es nulo y como la de “Nota 1” aquella en la que ese valor es 50% o mayor.

En cuanto al aspecto económico, teniendo en cuenta el subsidio antes mencionado de 50 millones de dólares estadounidenses, se adoptó como situación ideal “Nota 10” que la alternativa tenga como costo total un valor de hasta el subsidio. Se calificó con “Nota 1” las alternativas con costo total que superaran 50% el subsidio otorgado.

Para calificar el aspecto ambiental se consideraron los impactos provocados por la construcción y operación de las distintas alternativas, según una escala semántica:

- Nota 10: bajo impacto ambiental;
- Nota 8: impacto ambiental tolerable;
- Nota 5: impacto ambiental medio;
- Nota 3: alto impacto ambiental;
- Nota 1: impacto intolerable.

El aspecto técnico se refiere a la dificultad para la captación, almacenamiento, distribución, operación y mantenimiento del sistema. Para este caso, también se adoptó una escala semántica similar a la usada en el aspecto ambiental:

- Nota 10: dificultad baja;
- Nota 8: dificultad tolerable;
- Nota 5: dificultad media;
- Nota 3: dificultad alta;
- Nota 1: dificultad intolerable.

## **2.1. La selección de la alternativa más conveniente**

Para definir la importancia relativa entre los aspectos considerados como relevantes para la toma de decisión, se aplicó una variante del Método Delphi, a través de ruedas de consultas con técnicos y funcionarios oficiales. La matriz de comparaciones paritarias consensuada fue la que se muestra en la Figura 3:



	Aspecto social	Aspecto económico	Aspecto ambiental	Aspecto técnico
Aspecto social	1,00	2,00	3,00	5,00
Aspecto económico	0,50	1,00	1,50	2,50
Aspecto ambiental	0,33	0,67	1,00	1,67
Aspecto técnico	0,20	0,40	0,60	1,00
Sumatoria	2,03	4,07	6,10	10,17
1/Sumatoria	0,49	0,25	0,16	0,10
Valor normalizado (importancia relativa)	<b>0,49</b>	<b>0,25</b>	<b>0,16</b>	<b>0,10</b>

Figura 3. Comparaciones paritarias entre los aspectos que fueron considerados

Seguidamente, para cada alternativa se calculó sus distancias a la situación ideal (minimizar) y a la antiideal (maximizar). Los resultados son mostrados en las Figuras 4 y 5.

Aspectos	Importancia (ponderad.)	Acueducto				Cosecha de agua			
		Valor	Nota	Dif. coord. al punto ideal, ponderada	(Dif. coord. al punto ideal, ponderada) <sup>2</sup>	Valor	Nota	Dif. coord. al punto ideal, ponderada	(Dif. coord. al punto ideal, ponderada) <sup>2</sup>
Social [%]	0,49	0	10,00	0,00	0,00	4,11%	9,26	0,36	0,13
Económico [10 <sup>6</sup> US\$]	0,25	68,16	3,46	1,61	2,58	86,44	1,00	2,21	4,90
Ambiental	0,16	Tolerable	8,00	0,33	0,11	Alto a Intolerable	2,50	1,23	1,51
Técnico	0,10	Tolerable	8,00	0,20	0,04	Tolerable a Media	7,00	0,30	0,09
Distancia Total (Ponderada)		1,65				2,57			

Aspectos	Importancia (ponderad.)	Techos + aljibes				Pozos someros + infiltración			
		Valor	Nota	Dif. coord. al punto ideal, ponderada	(Dif. coord. al punto ideal, ponderada) <sup>2</sup>	Valor	Nota	Dif. coord. al punto ideal, ponderada	(Dif. coord. al punto ideal, ponderada) <sup>2</sup>
Social [%]	0,49	8,22%	8,52	0,73	0,53	0,00	10,00	0,00	0,00
Económico [10 <sup>6</sup> US\$]	0,25	157,00	1,00	2,21	4,90	83,80	1,00	2,21	4,90
Ambiental	0,16	Tolerable	8,00	0,33	0,11	Medio	5,00	0,82	0,67
Técnico	0,10	Tolerable a Media	7,00	0,30	0,09	Media	5,00	0,49	0,24
Distancia Total (Ponderada)		2,37				2,41			

Figura 4. Distancia al punto ideal (minimizar)



Aspectos	Importancia (ponderad.)	Acueducto				Cosecha de agua			
		Valor	Nota	Dif. coord. al punto antiideal, ponderada	(Dif. coord. al punto antiideal, ponderada) <sup>2</sup>	Valor	Nota	Dif. coord. al punto antiideal, ponderada	(Dif. coord. al punto antiideal, ponderada) <sup>2</sup>
Social (9%)	0,49	0	10,00	4,43	19,59	4,11%	9,26	4,06	16,50
Económico (10% U\$S)	0,25	68,16	3,46	0,61	0,37	86,44	1,00	0,00	0,00
Ambiental	0,16	Tolerable	8,00	1,15	1,32	Alto a Intolerable	2,50	0,25	0,06
Técnico	0,10	Tolerable	8,00	0,69	0,47	Tolerable a Media	7,00	0,59	0,35
<b>Distancia Total (Ponderada)</b>		<b>4,66</b>				<b>4,11</b>			

Aspectos	Importancia (ponderad.)	Techos + aljibes				Pozos someros + infiltración			
		Valor	Nota	Dif. coord. al punto antiideal, ponderada	(Dif. coord. al punto antiideal, ponderada) <sup>2</sup>	Valor	Nota	Dif. coord. al punto antiideal, ponderada	(Dif. coord. al punto antiideal, ponderada) <sup>2</sup>
Social (9%)	0,49	8,22%	8,52	3,70	13,68	0,00	10,00	4,43	19,59
Económico (10% U\$S)	0,25	157,00	1,00	0,00	0,00	83,80	1,00	0,00	0,00
Ambiental	0,16	Tolerable	8,00	1,15	1,32	Medio	5,00	0,66	0,43
Técnico	0,10	Tolerable a Media	7,00	0,59	0,35	Media	7,00	0,59	0,35
<b>Distancia Total (Ponderada)</b>		<b>3,92</b>				<b>4,51</b>			

Figura 5. Distancia al punto ideal (minimizar)

El ranking de preferencias que se obtuvo es mostrado en la Figura 6.

Alternativa	Ranking	
	Distcia. a situación ideal	Distcia. a situación antiideal
Acueducto	1°	1°
Cosecha de agua	4°	3°
Techos + Aljibes	2°	4°
Pozos someros + Infilt.	3°	2°

Figura 6. Orden de preferencia de las alternativas de localización analizadas

### 3. DISCUSIÓN DE DATOS Y RESULTADOS

Se contó con un estudio hidrológico prexistente, de doce años continuos de precipitaciones diarias de las localidades de la región. Con esos datos se calculó el porcentaje del tiempo con abastecimiento por debajo de la dotación adoptada, especialmente para las alternativas que competían con el acueducto.

La opción del acueducto presentó la menor distancia ponderada a la situación ideal y, simultáneamente, la máxima a la situación antiideal, conjunción no mostrada por



las otras (por ejemplo, la alternativa “techos y aljibes” estuvo 2ª en el ranking según su distancia a la situación ideal y 4ª por su distancia a la antiideal).

Si bien había una predilección previa por el acueducto, el hecho de que incluyera un trecho de alrededor de 200km sin caminos y sin atravesar poblaciones, ponía en dudas su factibilidad técnica, sobre todo en lo referido a operación y mantenimiento. Por otra parte, el trasvase de cuencas que de hecho provoca un acueducto, era un cuestionamiento fuerte por parte de los ambientalistas que integraban el grupo de los stakeholders.

Sin embargo, y en términos más generales, las otras alternativas también presentaban impactos ambientales relativamente altos, sobre todo para garantizar la dotación adoptada. Por ejemplo, la alternativa de pozos someros e infiltración presentaba un problema especialmente serio, que era la salinidad de los suelos, que se transmitía al agua y requería como tratamiento la nanofiltración a través de ósmosis inversa, muy compleja y que tiene un consumo de energía muy elevado y que, además, genera residuos peligrosos, como por ejemplo el boro, que requerirían un tratamiento ambiental muy delicado. Por su parte, la alternativa cosecha de agua requeriría una tala importante de isletas de monte existentes, generando un impacto ambiental fuerte.

En cuanto a la alternativa techos y aljibes, la superficie necesaria para alcanzar la dotación adoptada era verdaderamente desproporcionada y, consecuentemente, de muy alto costo.

Continuando con el aspecto económico, se destaca que ninguna de las alternativas comparadas tuvo un costo total dentro del monto del subsidio otorgado: la alternativa acueducto estuvo 36% arriba y las otras lo superaron en más del 60%.

#### **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

La aplicación de una técnica multicriterio permitió dar un poco de objetividad al proceso decisorio de elegir una entre cuatro alternativas posibles para el abastecimiento de agua a la región de interés en el Chaco Paraguayo, siendo que a priori ninguna de esas alternativas se mostraba ni mejor ni peor que las otras (más allá que el acueducto parecía ser la mejor alternativa, aunque presentaba problemas técnicos relacionados con el hecho que debería atravesar alrededor de 200km de una zona sin poblaciones ni caminos).

Se utilizó una combinación del “Método del Análisis Jerárquico” y la “Programación de Compromiso”, ambos de sólida base matemática y lógica, adoptando una variante que permite poner en una misma métrica aspectos muy diferentes y, por lo tanto, difíciles de comparar entre sí.

Con esta metodología y este análisis, que si bien es cuantitativo, tiene connotaciones cualitativas y, por lo tanto depende de percepciones e interpretaciones que podrían variar, quedó claro que, si el objetivo es garantizar una dotación de agua potable de 160 l/hab/día, a un costo económico y ambiental razonable y sin demasiadas complicaciones técnicas, el acueducto es la alternativa recomendable, pero sin descartar las otras, que podrían ser tenidas en cuenta para una provisión complementaria, para atender, por ejemplo, usos menos prioritarios.

#### **5. REFERENCIAS**

Barbosa, P.S.F. (1997). “O emprego da análise multiobjetivo no gerenciamento dos recursos hídricos”. Água em revista. n8, pp 42-46.



XXXI ENDIO  
XXIX EPIO



UNIVERSIDAD NACIONAL  
de MAR DEL PLATA  
\*\*\*\*\*

- Cohon, J.L. (1991). "Multiobjective programming and planning". New York: Academic Press. 333p.
- Consulting Engineers Salzgitter. CES. (2001). Estudio de Factibilidad Técnico – Económico del Sistema de Acueducto: Río Paraguay – Chaco Central.
- 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.
- Fertonani, Prendes. (1984). "Anales del 14 Congreso Nacional del Agua". Olavarría, Argentina. p.203 a 207.
- Fundación para el desarrollo del Chaco. (2005). "Atlas climático Chaco paraguayo". [www.desdelchaco.org.py](http://www.desdelchaco.org.py).
- Harder, W . (2009). "Experiencia de la cosecha de agua de lluvia en el Chaco Central Paraguayo". 2º Seminario de Pasturas del NEA y 1º Seminario de Pasturas del MERCOSUR. Formosa, Argentina.
- Monte Domecq R. , Baez J. (2007). "Informe final Plan de aguas para el Chaco".
- Pilar, J.V. (2005). "Propuesta de optimización multiobjetivo para el trazado de obras de ingeniería: El caso de la defensa norte de la ciudad de Resistencia – Chaco". In: XX Congreso Nacional del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur – CONAGUA 2005. Mendoza, Argentina. Anales.
- Pilar, J.V. (2012). "Herramientas para la gestión y la toma de decisiones". Ed. Hanne, 2da. Ed. Salta, 138p.
- Purschel . (1976). "Tratado general del agua y su distribución", la captación y el almacenamiento del agua potable", tomo 5, Ed. Urmo SA.
- Romero, C. (1996). "Análisis de las decisiones multicriterio". Madrid: Algorán 115p.
- Saaty, T. (1991). "Método de análisis jerárquica". São Paulo: McGraw-Hill, Makron. 367p.
- Ruberto, A.; Gómez, M.; Tynkiw, P; Pilar, J; Galeano, F.(2013). Estudio de alternativas de abastecimiento de agua fresca en El Chaco Paraguayo XXIV Congreso Nacional del Agua". San Juan, Argentina.
- Tynkiw, P. (2010). "Estudio técnico de alternativas de abastecimiento de agua al Chaco Central - Proyecto Acueducto Río Paraguay - Loma Plata - Filadelfia – Neuland - Irala Fernández – Lolita. Informe final de consultoría BID", Asunción, Paraguay.