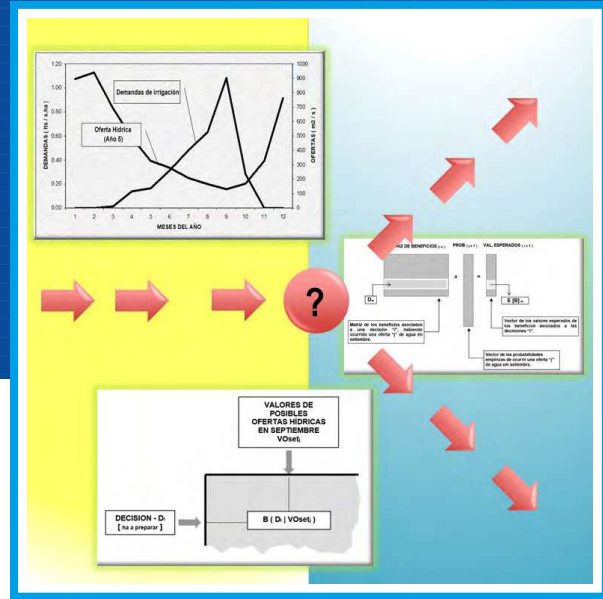


# Propuesta de modelo de decisión para optimizar una producción agrícola bajo riego

Jorge Víctor Pilar<sup>1,2,3</sup> y Marcelo Justo Manuel Gómez<sup>1</sup>

1. Grupo de investigación del Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste (UNNE).
2. Facultad de Ciencias Económicas, Universidad Nacional del Nordeste (UNNE).
3. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Misiones (UNaM).

Correo-e: [jvpilar@gmail.com](mailto:jvpilar@gmail.com)



## RESUMEN

El gerenciamiento de un sistema hídrico sin regulación para abastecer usos múltiples puede transformarse en una tarea complicada, especialmente cuando se deben tomar decisiones con mucho tiempo de anticipación.

En situaciones similares se suele recurrir al uso de modelos determinísticos, trabajando con “futuro conocido” o de modelos “implícitamente estocásticos”, de forma determinística con series generadas sintéticamente.

Se presenta de forma esquemática y conceptual un modelo de decisión, basado en un caso real de una cuenca hídrica brasileña. En ella era necesario decidir anualmente qué porcentaje de la demanda sería atendida para no malograr el resultado económico de esa campaña.

Se propuso un modelo de decisión que busca minimizar los riesgos de pérdidas económicas y que combina conceptos de la Teoría de la Decisión y técnicas de programación lineal, aplicable a la fase de planeamiento operativo interanual de una cuenca hidrográfica para abastecer varios distritos de riego.

**Palabras clave:** Planeamiento, Decisión, Riesgo, Optimización.

## ABSTRACT

The Management of unregulated water system for multiple uses, may become quite a complicated task, especially when decisions must be made well in advance.

In similar situations, deterministic models are often used, working with a “known future”, or “implicitly stochastic” models, in a deterministic way with synthetic generated series.

A decision model is presented schematic and conceptually based on a real case of a Brazilian basin. In it is necessary to decide annually the percentage of demand would be covered, in order to avoid economic losses.

A decision model was proposed that minimizes risks of economic losses and combines concepts of Decision Theory and linear programming techniques, applicable to the interannual operational planning phase of a basin to supply several irrigation districts.

## INTRODUCCIÓN

Cuando se está planificando desarrollar una región a partir de las posibilidades que brinda un sistema hídrico que la abastece, es común caer en un exceso de optimismo. Pero lo cierto es que ese recurso hídrico no es infinito y la mayoría de las veces no es posible atender adecuadamente todas las demandas de los proyectos que podrían ser implantados, por lo menos no todos los años.

Por ello, es necesario realizar, primeramente, una planificación estratégica para definir a nivel global y en base a los beneficios esperados, los proyectos que económica o socialmente convendría incorporar y, consecuentemente, las demandas que deberán ser atendidas cada año. El resultado será el Plan Maestro (o Plan Director), en el que prima la visión de largo plazo. En su elaboración se suelen utilizar modelos de optimización.

Posteriormente, será necesario pasar a la etapa de planificación de corto plazo, referida a la operación interanual de los proyectos económicos definidos en el Plan Maestro. Esta tarea se vuelve más complicada cuando en la cuenca hidrográfica no existen elementos que permitan la regulación de caudales. Para resolver estos problemas es común que se recurra a los modelos de simulación determinísticos o implícitamente estocásticos.

En este trabajo se propone un modelo para ayudar a los tomadores de decisiones en la tarea de definir, en un año hidrológico y teniendo en cuenta los distintos distritos de riego implantados en una región, qué demandas podrían ser atendidas para maximizar las probabilidades de beneficios o, lo que es lo mismo, minimizar los riesgos de pérdidas económicas.

Este modelo que, si bien fue desarrollado para dar una solución a un problema real y concreto en la cuenca del río Paracatú-Brasil, de uso principalmente agrícola, en la cual no existen represas para regular los caudales, será presentado de manera conceptual, sin ahondar en los resultados numéricos, pues se lo presenta como un esquema de aplicación amplia, que no se limita a la cuenca estudiada originalmente.

## EL PROBLEMA QUE SIRVIÓ DE BASE

El problema que sirvió de base para el desarrollo del modelo se localiza en la cuenca del río Paracatú, en Brasil. Esa cuenca se localiza al noroeste del estado de Minas Gerais, sudeste del estado de Goiás y al este del distrito federal de Brasilia, en Brasil. Su superficie es de 45.625 km<sup>2</sup>.

En el momento en que se tomó intervención, la cuenca tenía una población de aproximadamente 320.000 habitantes, con principal uso = agropecua-

rio, contándose con 800.000 cabezas de ganado, 37.100 ha bajo irrigación por aspersión y un proyecto de aproximadamente 81.500 ha a ser incorporadas a la agricultura bajo riego.

El condicionante era que toda captación de agua debía ser hecha a "pelo de agua", pues no existían (ni estaban previstas) represas para regular caudales. Una descripción más detallada de las características geográficas y fisiográficas de la cuenca pueden encontrarse en [1].

Según la legislación brasileña, el agua para abastecimiento humano y del ganado tienen prioridad sobre los demás usos (por ejemplo, el riego). De todas maneras, satisfacer esas demandas prioritarias no ofrecía problemas prácticos, pues fue comprobado que, históricamente, aún en los períodos de mayores estiajes, ello se conseguía sin mayores problemas.

La irrigación por aspersión era la que necesitaba ser analizada con especial cuidado, pues era la que presentaba conflictos importantes entre la demanda a ser atendida y las ofertas. Además, era el uso de mayor valor económico de la cuenca.

Las características hidrológicas y operativas del problema analizado pueden resumirse en lo siguiente:

1. En la cuenca existían 15 puntos de captación de agua para irrigación de varios tipos de cultivos, en especial frutas, hortalizas y leguminosas. Las demandas de irrigación iban desde mediados de abril hasta noviembre (este extenso período de irrigación se daba por la variedad de cultivos, con distintos calendarios agrícolas).
2. El pico de la demanda ocurría en el mes de setiembre.
3. En cuanto a las ofertas de agua, el pico de los caudales del río Paracatú ocurre, normalmente, entre febrero y marzo y a partir de ahí se inicia una marcada recesión hasta octubre, mes en el que comienzan las lluvias.
4. Se contó con 55 años de datos hidrológicos, con intervalo mensual.
- 5.

En la Figura 1 se puede apreciar que el pico de la demanda y el mínimo de la oferta coinciden. Esa figura representa una situación anual típica en una sección de captación ubicada cerca de la desembocadura del río.

Todos los años, la tierra a ser regada debía ser preparada y los canales de riego acondicionados, por lo que había que tomar la decisión de qué tamaño de superficie preparar. Esta decisión debía ser adoptada, como máximo, la última semana de marzo o la primera de abril (pues la segunda quincena de abril ya había que comenzar a regar), seis meses antes del pico de la demanda.

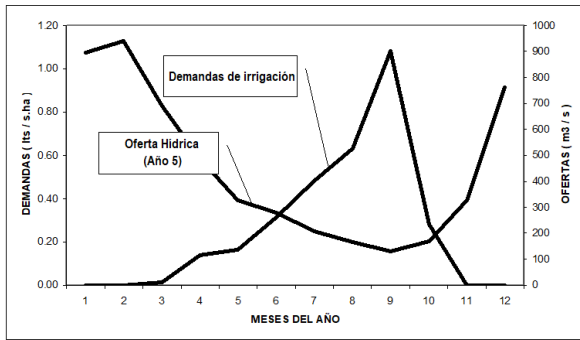


Figura 1: Comparación entre la oferta y la demanda hídricas.

### METODOLOGÍA PROPUESTA

Para decidir en un determinado año el tamaño de la superficie de las chacras a preparar (arar, sembrar, etc.) se desarrolló al efecto el modelo que se presenta a continuación, donde se verá que tiene una validez que no se agota en el caso de la cuenca que se estudió.

Entonces, primeramente, se montó una tabla de doble entrada, donde cada línea corresponde a una decisión sobre el tamaño de la superficie a preparar en un determinado año, mientras que cada columna representa una de las posibles ofertas hídricas en setiembre. De esta manera, en cada casillero o celda de la tabla se consignan los beneficios que podrían esperarse de una decisión en caso de darse la oferta indicada en el encabezado de la columna. Esta tabla es mostrada en la Figura 2 y es lo que se conoce como matriz de contingencias [2].

La decisión que se tome estará asociada a una demanda para setiembre, que sería la que maximizará los beneficios. Pero, ¿qué pasaría si en ese punto de captación de agua la oferta hídrica en setiembre fuese menor que esa demanda?, ¿o si fuese mayor? Estas son situaciones indeseables y que sería preferible evitar.

Para ello se utilizó un criterio de penalización, que sigue el siguiente razonamiento:

- En caso que la oferta supere la demanda se estará en una situación de desaprovechamiento de las disponibilidades hídricas. Por ello, para penalizar esa situación se utilizaron los beneficios que se dejarían de ganar.
- En el caso contrario, o sea si la demanda superase la oferta, ya no sólo se tendrían beneficios malogrados por la falta de agua, sino que además se incurriría en gastos improductivos por la pérdida de los insumos (semillas, horas de laboreo, etc.) utilizados en las superficies que finalmente no podrán ser regadas.

En este punto cabe una aclaración: el esquema de penalización a ser adoptado debe reflejar las capacidades económicas y financieras de los productores de la región, así como su disposición a asumir riesgos, algo que los planificadores y tomadores de decisiones deberían conocer y tener en cuenta. La adopción de ese esquema de penalización es una decisión que no es menor.

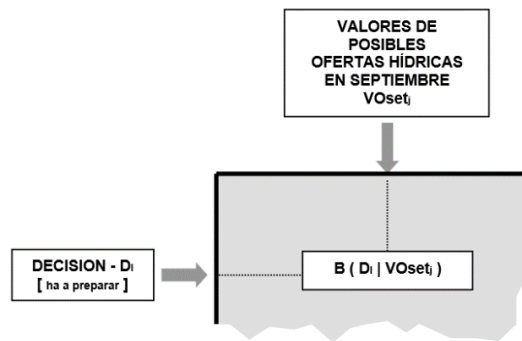


Figura 2: Matriz de los beneficios asociados a las decisiones, en función de las ofertas hídricas en setiembre.

Con los criterios mencionados, se llenó una tabla como la presentada en la Figura 2, que podría ser denominada “matriz de los beneficios asociados a una decisión, en función de una determinada oferta hídrica en setiembre”.

Esta tabla representa, utilizando la terminología de los modelos de apoyo a la decisión, una situación de conflicto, típica de los juegos de dos jugadores, donde estarían compitiendo el tomador de decisiones contra la Naturaleza y sus alternativas de ofertas hídricas para setiembre, muy similar a las situaciones que se analizan utilizando la Teoría de Juegos [2, 3]. Pero vale aclarar que, en los juegos de dos jugadores de la Teoría de Juegos tradicional, ambos contrincantes son inteligentes y están atentos a los “movimientos” y “contramovimientos” de su adversario, mientras que, en este caso, la Naturaleza participa a través de las ofertas hídricas, pero sin emociones, inmovible, independientemente de las decisiones que se tomen.

Si el comportamiento del río fuese totalmente imprevisible, una decisión aleatoria sería lo aconsejable [4,5]. Lo que equivaldría al “Criterio de Laplace” para decisiones en situación de incertidumbre [2, 3]. Sin embargo, en el caso de una cuenca hidrográfica, es posible que el registro hidrológico ofrezca una “pista” sobre los volúmenes que se podrían esperar para el “futuro” setiembre, al tener como base el volumen escurrido en marzo.

O sea, se estaría en una situación de frecuencias relativas condicionadas, análoga a las de probabilidad condicionada [7]. Se muestra la frecuen-

cia relativa de volúmenes que se esperarían para septiembre, donde ya se conoce el volumen escurrido durante marzo. Ello permitiría visualizar al problema como una situación de toma de decisiones bajo riesgo [2] en el que se utilizará el vector de frecuencias relativas de los volúmenes esperados para septiembre, al que se considera un ponderador razonable para la matriz de contingencias.

En el caso estudiado, esas frecuencias relativas condicionadas se estimaron para cada uno de los puntos de toma, a partir de las frecuencias de los rangos de volúmenes observados en setiembre y que ocurrieron en correspondencia con rangos de volúmenes observados en marzo. Para ello, los volúmenes de marzo y setiembre fueron clasificados en intervalos de clase y dispuestos en una matriz, donde en cada línea se indicó, en forma de frecuencias relativas, las veces que se observaron volúmenes dentro de ese intervalo en setiembre, para cada intervalo de volúmenes de marzo, según el registro de datos disponibles (55 años). Esta matriz es mostrada en la figura 3.

Volúmenes de marzo	Volúmenes de setiembre		
	Vset <sub>1</sub>	Vset <sub>2</sub>	Vset <sub>3</sub>
Vmar <sub>1</sub>	F [Vset = Vset <sub>1</sub>   Vmar = Vmar <sub>1</sub> ]	F [Vset = Vset <sub>2</sub>   Vmar = Vmar <sub>1</sub> ]	...
Vmar <sub>2</sub>	F [Vset = Vset <sub>1</sub>   Vmar = Vmar <sub>2</sub> ]	F [Vset = Vset <sub>2</sub>   Vmar = Vmar <sub>2</sub> ]	...
Vmar <sub>3</sub>	F [Vset = Vset <sub>1</sub>   Vmar = Vmar <sub>3</sub> ]	F [Vset = Vset <sub>2</sub>   Vmar = Vmar <sub>3</sub> ]	...

Figura 3: Frecuencias relativas de ocurrencia de volúmenes en setiembre, condicionadas a los volúmenes escurridos en marzo (por punto de captación).

Entonces, en un año cualquiera, conocido el volumen escurrido durante marzo, se entra a la matriz de la Figura 3 y se extrae la línea completa. Esta línea es un vector que representa la frecuencia relativa de ocurrencia de volúmenes de cada rango en setiembre, dado el volumen escurrido en marzo.

La optimización de la decisión se puede realizar aplicando programación lineal (PL), con variables binarias, según el esquema que se presenta a continuación:

Función Objetivo: Maximizar E [ Beneficios ] (1)

siendo:

$$E = \sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^J D_i \cdot [B_{i,j} \cdot F(Vset_j | Vmarzo = Vmarzo^*)] \quad (2)$$

respetando las siguientes restricciones:

1)  $\sum_{i=1}^D D_i = 1$

2) RESTRICCIÓN DE NO NEGATIVIDAD

donde:

E [Beneficios] valor esperado de los beneficios;

D<sub>i</sub> variable de decisión binaria asociada a la decisión i (sólo adopta valores **ceros** o **unos**);

B<sub>i,j</sub> beneficios asociados a la decisión i en el caso de disponerse en setiembre un volumen igual a j;

F(Vset<sub>j</sub> | Vmarzo = Vmarzo\*)

frecuencia relativa (ponderador) de la ocurrencia de una oferta j en setiembre dado que en marzo fue observado un volumen Vmarzo = Vmarzo\*;

i índice que representa una de las D decisiones que podrían ser tomadas;

j índice que representa las diferentes posibilidades de oferta hídrica en setiembre y que varía desde 1 (la oferta más baja observada) hasta J, la mayor de las ofertas observadas en el pasado.

En la Figura 4 se muestra una representación gráfica del esquema de optimización recién presentado: la decisión Dw que maximiza el valor esperado de los beneficios E[B]w sería la mejor decisión que podría ser tomada en esas condiciones.

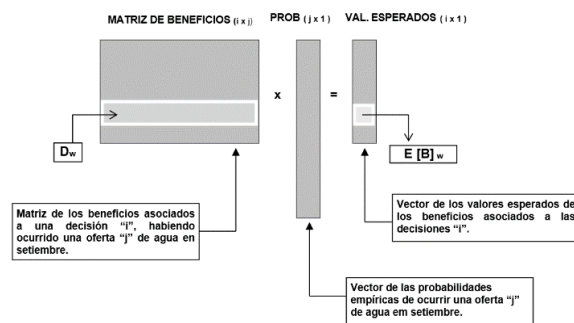


Figura 4: Esquema de optimización de las decisiones.

Sin embargo, el esquema explicado presenta una **no linealidad**, pues el agua disponible en uno de los puntos de captación es igual al aporte de todas las subcuencas de aguas arriba de ese punto, menos la sumatoria de todos los consumos hasta el punto ubicado inmediatamente aguas arriba, resultante del proceso de optimización de las demandas a ser atendidas.

Para conjurar esta dificultad, se puede utilizar un esquema de optimización "punto a punto": se inicia el proceso de optimización en el punto de captación ubicado más aguas arriba y se prosigue por el ubicado inmediatamente aguas abajo, considerando que el agua disponible es igual a los

aportes de las subcuencas de ambos puntos, menos la demanda optimizada del primero de ellos. El análisis de las frecuencias de los volúmenes observados para este segundo punto se realiza considerando los volúmenes acumulados (de él y del primero). Este procedimiento prosigue de manera recursiva para el resto de los puntos de captación.

## CONCLUSIONES

La metodología presentada, y que fuera desarrollada y aplicada en la cuenca del río Paracatú – Brasil, combina el criterio de “valor esperado-variancia” con lo que es llamado “factor de aversión al riesgo” [3] y las probabilidades condicionadas de Bayes.

Esta metodología permitiría adoptar decisiones que minimicen los riesgos de pérdidas económicas. Cabe destacar que el término **riesgo** es utilizado aquí, no en el sentido del valor numérico de una función densidad de probabilidad, sino en sentido relativo, significando que, de todas las decisiones posibles, la sugerida sería la que presenta **menor riesgo** de pérdidas.

El modelo de apoyo a la decisión presentado es muy simple de implementar y de llevar a la práctica, utilizando, por ejemplo, planillas de cálculo como la Excel®, específicamente a través del módulo “Solver”.

## REFERENCIAS

- [1] PILAR, J.V. (1998). Otimização de um sistema de recursos hídricos sem regulação - Caso analisado: Bacia do rio Paracatu. Porto Alegre: UFRGS – Curso de Posgraduación en Ingeniería, Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental. 113 p. Disertación (Maestría).
- [2] PILAR, J.V. (2012). Herramientas para la gestión y la toma de decisiones. Salta: Hanne. 160 p.
- [3] TAHA, H.A. (2012). Investigación de operaciones. México: Pearson. 827 p.
- [4] WAYNE, W.L. (2005). Investigación de operaciones. México: Cengage Learning Editores. 1418 p.
- [5] VENTSEL, E.S. (1983) Investigación de operaciones: problemas, principios, metodología. Moscú: MIR. 280 p.
- [6] WAGNER, H.M. (1986). Pesquisa operacional. 2a ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall. 851 p.
- [7] BENJAMIN, J.R.; CORNELL, C.A. (2014). Probability, statistics and decision for civil engineers. New York: Mc Graw-Hill. 648 p.