

Modelación económico matemática para decisiones óptimas en la cosecha de la caña de azúcar

Dr. C. Ramón Rodríguez Betancourt

Jefe del Centro de Estudio de Investigaciones Azucareras de la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales de la Universidad de Oriente, Santiago de Cuba
ramonrb@rrb.uo.edu.cu

RESUMEN

Se formula, construye e introduce la modelación económico-matemática asociada a un sistema informático, para perfeccionar y optimizar el proceso de planeación de la cosecha de la caña de azúcar, específicamente la determinación de la estrategia del corte, con vistas a minimizar el desfase y maximizar la producción de azúcar. Se lograron mayores volúmenes de azúcar con la misma cantidad de caña, debido a un mejor ordenamiento para el corte de variedades y cepas. Los costos de producción de azúcar disminuyeron hasta un 9 % en comparación con métodos tradicionales. La técnica novedosa empleada arrojó resultados significativos en las empresas azucareras de las provincias de Santiago de Cuba, Granma, Holguín y Guantánamo, Cuba. La investigación es importante por el redimensionamiento que en los últimos años ha tenido lugar en la industria azucarera y áreas cañeras, con vistas a lograr la competitividad del producto en el mercado mundial; además, algunos derivados de la caña de azúcar pueden utilizarse como portadores energéticos renovables, ante la subida de los precios del petróleo.

Palabras clave: *estrategia del corte, sistema Informático, programación por metas con prioridades, optimización, eficiencia*

ABSTRACT

A computerized economic-mathematical schedule was formulated, elaborated, and introduced to improve and optimize sugarcane harvest planning process, mainly in regards to cut strategy as a way to minimize lags in cutting procedure and maximize sugar production. Much more sugar was manufactured out of the same sugarcane harvested due to a better arrangement for varieties and strains cut strategy. Sugar production costs showed a 9 % decrease compared to the results obtained by traditional production methods. This new schedule proved successful in sugarcane manufacturing enterprises from Santiago de Cuba, Granma, Holguín, and Guantánamo provinces. The importance of this research lies in the sugar industry and the sugarcane fields rearrangement policy during the past few years in order to achieve sugar competitiveness in the international market; besides, some sugarcane byproducts can be used as renewable energy sources due to the increase of oil market prices.

Key Words: *cut strategy, computerized system, goal programming by priorities, optimization, efficiency*

INTRODUCCIÓN

En los últimos años el redimensionamiento que ha tenido lugar en la industria azucarera y áreas cañeras, con vistas a lograr la competitividad del producto en el

mercado mundial, se ha visto fortalecido por la subida de los precios del petróleo y el hecho de que algunos derivados de la caña de azúcar puedan utilizarse como portadores energéticos renovables.

En atención a estas circunstancias se desarrolla la presente investigación que trata de abarcar el siguiente objetivo: formular, construir e introducir la modelación económico-matemática asociada a un sistema informático que permita perfeccionar y optimizar el proceso de planeación de la cosecha en puntos fundamentales, como la determinación de la estrategia, programación del corte y su control, con vistas a minimizar el desfase¹ y maximizar la producción de azúcar.

DESARROLLO

La confección del plan de azúcar comienza con la determinación de los volúmenes de materia prima con que se cuenta para realizar la zafra, es decir, el cálculo de los estimados cañeros. El objetivo de este proceso es determinar qué se tiene realmente en cada campo en cuanto a variedades, cepas, edades, rendimientos, etc., así como cuáles campos pueden molerse y cuáles no.

Esos estimados parten del campo y toman en cuenta todos los elementos que influyen en el rendimiento como: variedad, cepa, edad, mecanización, riego, etc. Por otra parte esta información sirve de base para determinar la estrategia de corte, proceso previo a la programación cuyo objetivo es dar una visión preliminar del ordenamiento del corte, teniendo en cuenta los elementos con que se cuenta hasta ese momento, con el mínimo de desfase posible y la máxima producción de azúcar.

El problema general de la estrategia del corte consiste en encontrar para cada entidad cañera un ordenamiento previo decenal de variedad-cepas y edades para el corte manual y el mecanizado, que haga máxima la producción de azúcar y minimice el desfase, lo cual depende directamente del orden de corte que se establezca. La estrategia de corte es un elemento de gran valor, que permite:

- Ordenar el corte de la caña atendiendo a su período óptimo de madurez.
- Compensar las cepas de ciclo largo y variedades florecedoras por centros de recepción.
- Buscar solución a los desfases en edades, variedades y cepas.
- Ordenar el corte de las demoliciones en función de la época de siembra y reposición.
- Priorizar el corte de las áreas resecentes² donde las cepas sufran por el fogueo.³
- Conocer y optimizar las distancias de tiro de cada etapa.
- Definir las áreas donde deban aplicarse maduradores.⁴

Las principales desventajas que ofrece el sistema actual son las siguientes:

¹ **desfase.** Ocurre cuando se corta la caña antes o después del momento óptimo. Entre otras muchas causas puede deberse, por Ej., a un comienzo anticipado de la molienda; o a interrupciones por problemas climáticos. (Todas las notas de este artículo son del editor.)

² **áreas resecentes.** Suelos que por sus características pierden la humedad más rápidamente que otros. Un ejemplo son los ferralíticos rojos.

³ **fogueo.** Efecto negativo de la sequía sobre caña que, por alguna razón, no se ha cortado.

⁴ **maduradores.** Productos que se aplican a los campos de caña —generalmente por aspersión aérea— con el objetivo de acelerar y mejorar la maduración de las plantas.

- El proceso es manual y complicado, pues deben compatibilizarse por decenas, los estimados por campos con la norma de la decena y además tener en cuenta los lineamientos establecidos.
- Lo trabajoso del proceso no permite seleccionar variantes; sino que se trabaja con una sola.
- Al cometerse un error en cualquier decena hay que rehacer el trabajo y compatibilizar de nuevo, cuestión esta que en la práctica presenta bastante dificultad.
- No se toman en cuenta los indicadores de pol, índice de madurez histórico, que permita minimizar el reordenamiento cuando se establezca la programación.
- Los resultados de la estrategia no se toman como base para la elaboración del plan de azúcar, sino que éste se establece por promedios de rendimientos de años anteriores, que no corresponden a estructuras de variedades y cepas actuales.

El modelo Z2-A que deben confeccionar la unidad básica de producción cooperativa (UBPC) y la empresa azucarera se compatibiliza con la estrategia de forma general, pero no a partir de la estrategia decenal, lo que ocasiona descuadre en el total molible por variedades y cepas.

En el momento en que se elabora la estrategia no se tienen en cuenta todos los elementos que determinan la madurez de la caña; ni se conocen anticipadamente el comportamiento posterior de la humedad por zonas ni la temperatura, por tanto hace falta un proceso posterior de ajuste. Este proceso es la *programación de corte*, que al mismo tiempo sirve de control del proceso.

Con respecto al cumplimiento y control de la programación se presentan múltiples dificultades en la cadena corte-alza-tiro, entre ellas: quema no programada, lluvia, falta y rotura de equipos de tiro y paralización del trabajo por diferentes causas.

El cumplimiento de la programación del corte es uno de los aspectos más importantes para el logro de los volúmenes de azúcar establecidos.

La existencia de alternativa en la estrategia del corte permite la aplicación de la modelación económico-matemática y en específico la programación por metas, con prioridades cuyo algoritmo de solución, incluido en la conformación de sistemas informáticos, permite dar respuesta rápida al problema planteado. Con estos elementos la formulación general del problema para el planteamiento matemático se expone seguidamente:

Formulación general del problema para el planteamiento matemático

En las empresas azucareras del país, la determinación de la estrategia del corte y su control son el eslabón fundamental en la planificación de la cadena de corte, alza y tiro, por tanto es un aspecto decisivo en la eficiencia de la zafra.

Para la determinación de la estrategia es posible obtener la información correspondiente a: los estimados de caña dados en toneladas por variedad, cepa, edad y por frente de corte;⁵ la norma operacional de tiro decenal por frente de corte dada en toneladas; la base de pol en caña por zonas edafoclimáticas (%); el plan de frescura en

⁵ **frente de corte.** Los mismos equipos de corte, alza y tiro son usados por dos o más unidades productoras

toneladas de caña a moler con más de doce horas de cortadas; el plan de materias extrañas (%); el plan de recobrado (%); las fechas de inicio y terminación de la zafra.

Toda esta información es asimilada por un sistema informático diseñado para plantear y resolver los modelos económico-matemáticos para el proceso de estrategia del corte y su control.

Si se tiene en cuenta que la determinación de la estrategia del corte parte de prioridades establecidas por lineamientos del Ministerio de la Industria Azucarera (MINAZ), en cuanto a la molienda de variedades y cepas, cumplimiento del plan de azúcar y minimización del desfase, entonces el problema se adapta perfectamente a la aplicación de la modelación económico-matemática y específicamente a la programación por metas con prioridades que, conjuntamente con los modernos lenguajes computacionales, permitan dar respuesta rápida al problema planteado. Los objetivos prioritarios son: minimizar el desfase y maximizar la producción de azúcar.

Planteamiento matemático

Conjuntos

K - Conjunto de todos los frentes de corte, con elemento típico k.

K₁ - Conjunto de frentes de corte que contienen campos con cepas quedadas, con elemento típico k;

K₂ - Conjunto de frentes de corte que contienen campos con cepas de frío, con elemento típico k;

K₃ - Conjunto de frentes de corte que contienen campos con cepas de ciclo corto, con elemento típico k.

$K_1, K_2, K_3 \subset K$.

I - Conjunto bloque-campo, con elemento típico i.

I_{1k} - Conjunto bloque-campo que contienen cepas quedadas que pertenecen al frente k, con elemento típico i.

I_{2k} - Conjunto bloque-campo que contienen cepas de frío que pertenecen al frente k, con elemento típico i.

I_{3k} - Conjunto bloque-campo que contienen cepas de ciclo corto que pertenecen al frente k, con elemento típico i.

$I_{1k}, I_{2k}, I_{3k} \subset I$.

J - Conjunto de todas las decenas, con elemento típico j.

J₁ - Conjunto de decenas en las que se cortan las cepas quedadas, con elemento típico j.

J₂ - Conjunto de decenas en las que se cortan las cepas de frío, con elemento típico j.

$J_1, J_2 \subset J$.

Parámetros

E_{ik} - Estimado molible, dado en toneladas, del bloque-campo i en el frente de corte k.

N_{jk} - Norma operacional, dada en toneladas, para la decena j en el frente de corte k.

m_{ijk} - Edad en el momento del corte, dada en meses, del bloque-campo i, que se corta en la decena j y en el frente de corte k.

C_{ijk} - Por ciento de rendimiento industrial, obtenido a partir del por ciento de pol en caña del bloque-campo i en la decena j y frente de corte k.

PA_k - Plan de producción de azúcar, dado en toneladas, para el periodo que se analiza en el frente k.

M₁, M₂, M₃ - Edades mínimas, dadas en meses con que se deben cortar las cepas de ciclo largo y corto.

P₁, P₂ - Prioridades que comprenden los lineamientos establecidos y el cumplimiento del plan de azúcar respectivamente.

Variables

X_{ijk} - Toneladas métricas de caña del bloque-campo i a moler en la decena j de zafra y que corresponde al frente de corte k.

d⁺_{1ik}, d⁻_{1ik} - Sobrelogro y sublogro, expresado en la misma unidad de medida de la restricción correspondiente, para minimizar el desfase en las cepas quedadas, durante la zafra.

d⁺_{2ik}, d⁻_{2ik} - Sobrelogro y sublogro, expresado en la misma unidad de medida de la restricción correspondiente, para minimizar el desfase en las cepas de frío.

d⁺_{3ik}, d⁻_{3ik} - Sobrelogro y sublogro, expresado en la misma unidad de medida de la restricción correspondiente, para minimizar el desfase en las cepas de ciclo corto.

d⁺_{4k}, d⁻_{4k} - Sobrelogro y sublogro, expresado en la misma unidad de medida de la restricción correspondiente, para cumplir el plan de azúcar.

Restricciones

Cumplimiento del plan de molienda para las cepas quedadas según prioridades:

$$\sum_{j \in J1} X_{ijk} = E_{ik}; i \in I1_k; k \in K1$$

Cumplimiento del plan de molienda para las cepas de frío, según prioridades:

$$\sum_{j \in J2} X_{ijk} = E_{ik}; i \in I2_k; k \in K2$$

Cumplimiento del plan de molienda para las cepas de ciclo corto:

$$\sum_{j \in J} X_{ijk} = E_{ik}; i \in I3_k; k \in K3$$

Cumplimiento de la norma de molienda para quedadas según prioridades

$$\sum_{i \in I1} X_{ijk} \leq N_{jk}; j \in J1; k \in K1$$

Cumplimiento de la norma de molienda para fríos, ciclo corto según prioridades:

$$\sum_{i \in I2} X_{ijk} \leq N_{jk}; j \in J2; k \in K2$$

Cumplimiento de la norma de molienda para ciclo corto:

$$\sum_{i \in I3} X_{ijk} \leq N_{jk}; j \in J; k \in K3$$

Cumplimiento de los lineamientos trazados en edad y etapa para las cepas quedadas:

$$\sum_{j \in J1} (m_{ijk} - M_1)X_{ijk} + d_{1ik}^- - d_{1ik}^+ = 0; i \in I1; k \in K1$$

Cumplimiento de los lineamientos trazados en edad y etapa para las cepas de frío:

$$\sum_{j \in J2} (m_{ijk} - M_2) X_{ijk} + d_{2ik}^- - d_{2ik}^+ = 0; i \in I2; k \in K2$$

Cumplimiento de los lineamientos trazados en edad y etapa para las cepas de ciclo corto:

$$\sum_{j \in J} (m_{ijk} - M_3) X_{ijk} + d_{3ik}^- - d_{3ik}^+ = 0; i \in I3; k \in K3$$

Cumplimiento del plan de producción de azúcar:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ijk} X_{ijk} + d_{4k}^- - d_{4k}^+ = PA_k; k \in K$$

No negatividad de las variables:

$$X_{ijk}, d_{1ik}^+, d_{1ik}^-, d_{2ik}^+, d_{2ik}^-, d_{3ik}^+, d_{3ik}^-, d_{4k}^+, d_{4k}^- \geq 0; \forall i, j, k$$

Función objetivo

$$MinZ = P_1 \sum_{i \in I, k \in K} (d_{1ik}^- + d_{2ik}^- + d_{3ik}^-) + P_2 \sum_{k \in K} d_{4k}^-$$

El análisis de las restricciones es el siguiente:

El conjunto de restricciones 1), 2) y 3) indica que todos los campos sembrados con primaveras quedadas deben molerse en la primera etapa de la zafra; los fríos a continuación y retoños deben molerse en todas las etapas de zafra y que su distribución decenal debe ser exactamente igual al estimado de caña del campo.

Las restricciones 4), 5) y 6) indican que los campos sembrados con las cepas de ciclo largo y corto, que se muelan en cualquier decena j no deben sobrepasar la norma de tiro para esa decena. Aquí se considera cada cepa hasta la decena en la cual es permisible su molida.

Las restricciones 7), 8) y 9) garantizan que no se produzca desfase por edades en las cepas de ciclo largo y corto; se plantean conforme al nivel de prioridad No. 1. La restricción indica que la diferencia de la edad que tiene la caña con respecto a la edad en que debe ser molida más el sublogro, menos el sobrelogro sea igual a cero, para toda i, j, k.

La restricción 10) garantiza el cumplimiento del plan de producción de azúcar según el nivel de prioridad No. 2, es decir la sumatoria del rendimiento industrial multiplicado por los miles de toneladas a moler en todos los frentes de corte más el sublogro, menos el sobrelogro tiene que ser igual al plan de producción de azúcar.

La restricción 11) garantiza la no negatividad de las variables.

En la función objetivo la primera prioridad (P1) se refiere a minimizar el desfase para las diferentes cepas, que están representadas por los sublogros correspondientes; la segunda prioridad (P2) consiste en maximizar el plan de producción de azúcar, para lo que se minimizan los sublogros correspondientes.

El modelo planteado tiene un número máximo de $(i*j*k)$ variables y $2[(I1*K1) + (I2*K2) + (I3*K3)] + (J1*K1) + (J2*K2) + (J*K3) + (K)$ restricciones, no obstante, el mismo puede ser resuelto por frente de corte, reduciéndose considerablemente su dimensión.

Teniendo en cuenta las distintas prioridades, el resultado obtenido, mediante un sistema informático, logrará la mejor variante que permita el mayor nivel de satisfacción de las metas establecidas, lo cual contribuirá a una disminución sustancial en los costos de producción, incremento de la rentabilidad de las empresas y a minimizar las decisiones improvisadas.

Lo anterior se presentará como un sistema informático, el cual brinda la solución en correspondencia con el sistema de modelos del MINAZ. Además el sistema informático brinda información adicional referente a la base de datos primaria.

Sistema Informático OPESCOR-05

El sistema informático OPESCOR-05 corre sobre Windows 98 o superior; utiliza en su programación el Borland Delphi 6, que posee un ambiente de desarrollo rápido de aplicaciones (R.A.D. Rapid Applications Development) y que por su aspecto visual permite crear una interfaz con el usuario lo más amigable posible, de manera tal que pueda ser operado con conocimientos mínimos sobre computación y el manejo de la tarea a desarrollar.

El sistema se instala de forma muy fácil y segura y puede ser operado aunque no se tenga ningún conocimiento especializado en computación, ya que importa la información primaria, la verifica y emite su informe de resultados en el mismo formato que utiliza el programador para elevar la información a niveles superiores, lo que representa una gran ventaja. La base teórica del sistema se basa en la metodología de análisis y diseño orientada a objetos.

El sistema informático OPESCOR-05 no está diseñado para sustituir a ninguno de los sistemas vigentes establecidos para la cosecha (SICE y ZF38), sino para coexistir con ellos. El sistema importa datos de estos sistemas, los utiliza para la optimización y luego los exporta hacia ellos para que se cumplan otras funciones de la zafra. El sistema puede realizar las siguientes tareas:

- Importa y exporta información primaria y resultados a los sistemas de zafra SICE y ZF38.
- Determina la estrategia y programación del corte, maximizando la producción de azúcar o de miel y minimizando el desfase.
- Realiza la liquidación.
- Prepara la información para la próxima zafra; en este sentido cambia la cepa y la edad en cada campo automáticamente.
- Emite los informes de resultados con el mismo formato que utiliza el MINAZ para su información.
- Ofrece reportes auxiliares complementarios sobre variedades, cepas, mecanización, etc.
- Puede realizar la programación por los dos métodos existentes, índice de madurez y el coeficiente sobre hojas activas.
- Puede integrar y desintegrar entidades con sus respectivas bases de datos.

En la tabla se ofrecen los datos finales para una empresa azucarera de la provincia de Santiago de Cuba, en la zafra 2005-2006.

Los datos se explican por sí solos. Se destaca el sobrecumplimiento del plan de azúcar y el cumplimiento de plan de corte óptimo al 96,5 %, lo que implicó el sobrecumplimiento del plan, que se fijó muy por debajo de sus potencialidades. Como dato adicional los costos de producción de esa zafra bajaron un 8 %.

Se cuenta con los avales del MINAZ, grupo empresarial agroindustrial y Empresa Azucarera que confirman la aplicación del sistema en Santiago de Cuba, Granma,

Datos finales de la Empresa Azucarera Julio A. Mella de la provincia Santiago de Cuba en la zafra 2005-2006

Indicadores	UM	Planificación de la Empresa.	Datos finales Sistema OPESCOR	Datos reales	%
		1	2	3	3/1
Estimados	t	480 509,1	480 509,1	451 768,3	94,0
Azúcar producida	t	49 011,9	61 085,7	51 095,0	104,3
Rendimiento industrial	%	10,20	12,71	11,31	110,9
Recobrado	%	83,7	83,7	82,07	98
Materia extraña	%				
Manual		2,5	2,5	2,69	107,6
Mecanizada		12,0	12,0	12,2	101,7
Plan de frescura	horas agrícolas	≤ 36	≤ 36	≤ 49	
Plan de corte óptimo	%	100,0	100,0	96,5	96,5

Guantánamo y Holguín.

CONCLUSIONES

La puesta a punto e introducción del Sistema OPESCOR-05 en las empresas azucareras seleccionadas de las provincias orientales y en particular en la Empresa Azucarera, permitió arribar a las siguientes conclusiones:

Los objetivos propuestos fueron cumplidos. Se respondió a un problema concreto que presenta la industria azucarera, avalado por programas nacionales y territoriales de ciencia y técnica.

La aplicación del sistema en la Empresa Azucarera, demuestra que puede aumentarse las cifras del plan de azúcar.

El cumplimiento del plan óptimo de corte conllevó a que los costos de producción de azúcar disminuyeran en esa zafra en un 8 %:

RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se recomienda lo siguiente:

Garantizar mediante un programa establecido las necesidades mínimas de computación, transporte y calificación del personal para generalizar el sistema propuesto a otras empresas azucareras de las provincias Holguín y Las Tunas.

BIBLIOGRAFÍA

- ALMAZÁN, O.: "Viabilidad y alternativa económica", *Bohemia*, (23): 15-19, 2002.
- CARNOTA, O. y R. VILLANUEVA: *Proyección de un SAD*, Ed. Pueblo y Educación, La Habana, 1989.
- CHARNES, A. y W. COOPER: *Management Model and Industrial Applications of Linear Programming*, Ed. John Wiley and Sons, New York and London, 1961.
- EPPEN, G. D. y F. J. GOULD: *Investigación de operaciones en la ciencia administrativa*, Prentice-Hall Hispanoamericana, México, 2003.
- GUJARATI, D. N.: *Basic Econometrics*, 4^{ta} ed., Ed. McGraw-Hill, 2004.
- HILLER, F. y G. LIEBERMAN: *Introducción a la Investigación de operaciones*, 7ma. ed., McGraw Hill, México, 2001.
- LEÓN, R.: Metodología propuesta para la elaboración de un sistema automatizado en la determinación de la estrategia óptima del corte, tesis de doctorado en Ciencias Económicas, Universidad de Oriente, 1996.
- MINISTERIO de ECONOMÍA y PLANIFICACIÓN: Indicaciones metodológicas para la elaboración del plan de la economía nacional, La Habana, 2002.
- MINAZ: Informe al grupo de Control Gubernamental, Ministerio del Azúcar, Cuba, noviembre, 1999.
- MINAZ: Metodología para la confección del plan técnico económico de zafra, Ministerio de la Industria Azucarera, La Habana, 2005.
- MOSKOWITZ, H. y G. WRIGHT: *Investigación de operaciones*, Prentice-Hall Hispanoamericana, México, 2005.
- MINAZ: Nuestros esfuerzos principales se dirigen hacia la caña y los cañeros, documento del Ministerio de la Industria Azucarera, Cuba, 2002.
- PÉREZ, A.: Determinación de las curvas de pol y pureza por variedad cepa y edad en la EA *Rafael Reyes*, trabajo de diploma, Universidad de Oriente, 2001.
- RODRÍGUEZ, R. y M. ARRIETA: *Principales modelos económicos matemáticos aplicados a la Industria Azucarera*, Universidad de Oriente, 1989.
- RODRÍGUEZ, R.; R. AGUILERA y R. LEÓN: Programación matemática borrosa para la determinación de la estrategia del corte, Memorias del IV Congreso de la SIGEF, Universidad de Oriente, 1997.
- ROSCOE, D. y P. McKEOWN: *Modelos cuantitativos para la administración*, Grupo Editorial Iberoamericano, Universidad de Georgia, 1991.

