

Planificación eficiente del proceso de recolección de la caña de azúcar (mediante la aplicación de técnicas de avanzada)

Dr. C. Ramiro Infante Roblejo*
MSc. Xiomara Vázquez Carrazana**

El trabajo ofrece los aspectos esenciales de una metodología para obtener las vinculaciones óptimas desde los bloques cañeros a los centros receptores de caña mediante la utilización de métodos y modelos económico-matemáticos.

Los modelos planteados permiten realizar un análisis integral del corte, alza, transporte, recepción y producción de azúcar; además, se utilizan métodos estadístico-matemáticos, para procesar y comprobar los parámetros y coeficientes de los modelos. Los resultados prácticos obtenidos con aplicación de la metodología son superiores a los logrados con métodos tradicionales.

Introducción

EN EL proceso de recolección de la caña de azúcar el corte, alza, tiro y recepción como actividades de la agroindustria azucarera juegan un papel decisivo tanto económico como productivo, pues constituyen el vínculo indispensable entre la agricultura y la industria.

* Profesor asistente, vicedecano de Investigación de la Facultad de Contabilidad y Finanzas, Universidad de Granma.

** Profesora asistente, Jefa del Departamento de Contabilidad y Finanzas de la Facultad de Contabilidad y Finanzas, Universidad de Granma.

Dada la necesidad del funcionamiento sincronizado del sistema de recolección de la caña de azúcar y de reducir al mínimo posible las fallas de sus eslabones: *corte, alza, transportación y recepción*; surge la *tarea* de establecer la relación más eficiente y funcional de las vinculaciones cañeras desde los diferentes bloques cañeros a los centros receptores, dentro y entre centrales azucareros, con el objetivo de disminuir los costos totales de transportación, y de lograr una mayor racionalidad de los medios utilizados en la recolección de la cosecha.

El correcto nexo entre los cuatro eslabones del proceso de recolección determina el éxito de la gestión entre la agricultura y la industria, por lo que a ello los productores durante el proceso de planificación le dedican los mayores esfuerzos, pero sin lograr en la mayoría de los casos los resultados esperados.

En el actual proceso de recuperación azucarera constituye un objetivo priorizado de la política económica del MINAZ el uso racional de los equipos y el incremento de la producción azucarera y de la eficiencia económica; siendo el núcleo central de este último la disminución del costo total. En correspondencia con esto se hace necesario considerar el aspecto económico del transporte agrícola, como uno de los más importantes del sistema.

En la actualidad no se emplean métodos científicos en la planificación de las vinculaciones cañeras, predomina el empirismo, los métodos manuales y el carácter histórico de las vinculaciones que imposibilitan analizar todas las variantes de vinculación y lograr niveles de eficiencia. De ahí que la solución científica del problema se pueda lograr utilizando los métodos modernos de planificación mediante el empleo de técnicas de avanzadas como la Modelación Económico-Matemática.

En la revisión bibliográfica se comprobó que en el contexto nacional han existido trabajos científicos importantes relacionados con la optimización de las vinculaciones cañeras, no obstante, presentan sus limitaciones pues en estos no se hace un análisis integral del sistema de corte, alza, tiro, recepción y producción de azúcar; ninguno incluye el corte ni el alza; no poseen una metodología para determinar los principales parámetros y los procedimientos utilizados para el cálculo del costo, en la generalidad de los casos no satisface la obtención del indicador. Además, los trabajos no han tenido un uso y seguimiento sistemático que permitieran validar sus resultados en la práctica como consecuencia de realizar aplicaciones sucesivas.

Las soluciones propuestas en el presente trabajo dan respuesta y están en correspondencia con los Programas Nacionales Científico-técnicos del CITMA y del MINAZ.

Circunscribiendo el trabajo a la problemática abordada se trazó como propósito de este mostrar los resultados y aspectos esenciales de una metodología, para la planificación óptima de las vinculaciones de los bloques cañeros a los centros de recepción, dentro y entre centrales azucareros, mediante la utilización de los métodos y modelos económico-matemáticos.

Para la elaboración de la metodología se hace necesario preparar, procesar y comprobar la información de partida donde se utilizan técnicas estadísticas y de cálculo matemático, entre las que se encuentran el Análisis de Regresión y Correlación, Pruebas de Hipótesis y el Cálculo Diferencial e Integral.

Formulación general del problema. Planteamiento matemático de los modelos

Para garantizar el cumplimiento de los planes de producción de azúcar es indispensable la transportación de la caña de azúcar desde un conjunto de orígenes i llamados *bloques cañeros*, pertenecientes a las unidades productoras de caña l , hasta un conjunto de destinos j llamados *centros de recepción*, correspondientes a un *único central*, o a q *centrales* (de existir vinculaciones entre centrales).

Los vínculos son posibles realizarlos por más de un *medio de transporte* de tipo k , correspondientes a las unidades de transporte p ; además, se cuenta con *medios de cosecha y alza mecanizada* cuyas capacidades disponibles son limitadas.

Conociendo la producción estimada posible de cada bloque; la capacidad estimada de los centros de recepción, de los tipos de transporte, de las alzadoras y de corte de las cosechadoras; así como el costo de transportación por cada cien arrobas de caña; *el problema a resolver consiste* en determinar los volúmenes de caña a vincular desde los bloques cañeros a los centros de recepción, así como la vía por la cual debe realizarse la transportación, con el propósito de minimizar el costo total de transportación.

Como una vía para lograr la integración territorial de la producción azucarera y alcanzar una adecuada eficiencia económica, en los centrales q de un macizo cañero; se hace indispensable conocer cuál sería la mejor forma de vincular la caña disponible desde los bloques i de los *centrales colindantes*, a los centros de recepción j de los centrales azucareros q *de mayor eficiencia*. Con el fin de obtener volúmenes de producción de azúcar iguales o superiores a los niveles planificados, con el objetivo de minimizar el costo total de transportación.

Para lograr lo antes expuesto y dar solución a la problemática planteada en el trabajo se analizan y desarrollan *modelos de Programación Matemática* enfocados como modelos *de Programación Lineal* relacionados con las vinculaciones cañeras *dentro y entre* centrales azucareros.

**Modelo económico-matemático de vinculación cañera
dentro de un central azucarero, aplicando la programación lineal (modelo I)**

Índices:

$i \in 1:n$ Bloques cañeros. $k \in 1:f$ Tipos de transporte. $p \in 1:h$ Unidades de transporte.

$j \in 1:m$ Centros de recepción. $l \in 1:g$ Unidades de producción.

Parámetros del modelo:

O_{il} :Producción total estimada molible a cortar en el bloque cañero i de la unidad de producción l , durante la campaña azucarera en cientos de arrobas de caña.

D_j :Capacidad disponible total estimada del centro de recepción j , durante la campaña azucarera en cientos de arrobas de caña.

T_{kp} :Capacidad disponible total estimada del tipo de transporte k perteneciente a la unidad de transporte p , durante la campaña azucarera en cientos de arrobas de caña.

A_l :Capacidad disponible total estimada de las alzadoras correspondientes a la unidad de producción l , durante la campaña azucarera en cientos de arrobas de caña.

C_l :Capacidad disponible total estimada de corte de las cosechadoras correspondientes a la unidad de producción l , durante la campaña azucarera en cientos de arrobas de caña.

C_{ijk}^{lp} :Costo de transportación, por ciento de arrobas de caña de azúcar a transportar desde el bloque cañero i , correspondiente a la unidad de producción l , al centro de recepción j , por el tipo de transporte k perteneciente a la unidad de transporte p .

Variables:

X_{ijk}^{lp} : Cientos de arrobas de caña de azúcar a transportar desde el bloque cañero i correspondiente a la unidad de producción l , al centro de recepción j , por el tipo de transporte k de la unidad de transporte p , durante la campaña azucarera.

Sistema de restricciones:

Restricción de tipo **I**: Cumplimiento de la tarea de corte por bloque cañero.

$$\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^f \sum_{p=1}^h X_{ijk}^{lp} = O_{il}; \quad i \in 1:n, l \in 1:g$$

Restricción de tipo **II**: Disponibilidad de la capacidad estimada de los centros de recepción.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^f \sum_{l=1}^g \sum_{p=1}^h X_{ijk}^{lp} \leq D_j; \quad j \in 1:m$$

Restricción de tipo **III**: Disponibilidad de la capacidad estimada de los medios de transporte.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^g X_{ijk}^{lp} \leq T_{kp}; \quad k \in 1:f, p \in 1:h$$

Restricción de tipo **IV**: Disponibilidad de la capacidad estimada de los equipos de alza.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^f \sum_{p=1}^h X_{ijk}^{lp} \leq A_l; \quad l \in 1:g$$

Restricción de tipo **V**: Disponibilidad de la capacidad estimada de las cosechadoras.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^f \sum_{p=1}^h X_{ijk}^{lp} \leq C_l; \quad l \in 1:g$$

Restricción de tipo **VI**: Condición de no negatividad de las variables.

$$X_{ijk}^{lp} \geq 0; i \in 1:n, j \in 1:m, k \in 1:f, l \in 1:g, p \in 1:h$$

Función objetivo:

$$\text{MIN } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^f \sum_{l=1}^g \sum_{p=1}^h C_{ijk}^{lp} X_{ijk}^{lp}$$

Modelo económico - matemático de vinculación cañera entre centrales azucareros colindantes, aplicando la programación lineal (modelo II)

índices:

$i \in 1:n$ Bloques cañeros. $k \in 1:f$ Tipos de transporte. $p \in 1:h$ Unidades de transporte.

$j \in 1:m$ Centros de recepción. $l \in 1:g$ Unidades de producción. $q \in 1:r$ Centrales azucareros.

Se consideran los *parámetros* y *variables* definidas en el *modelo I*, pero haciendo referencia al central q . Además se incluyen los **parámetros** siguientes:

S :Azúcar propuesta a producir en conjunto por los centrales durante la campaña azucarera en toneladas de azúcar.

R_q: Rendimiento industrial promedio en el central q .

K : Factor de conversión de cientos de arrobas a toneladas.

Sistema de restricciones:

Restricción de tipo **I**: Cumplimiento de la tarea de corte por bloque cañero.

$$\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^f \sum_{p=1}^h X_{ijk}^{lpq} = O_{ilq}; i \in 1:n, l \in 1:g, q \in 1:r$$

Restricción de tipo **II**: Disponibilidad de la capacidad estimada de los centros de recepción.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^f \sum_{l=1}^g \sum_{p=1}^h X_{ijk}^{lpq} \leq D_{jq}; j \in 1:m, q \in 1:r$$

Restricción de tipo **III**: Disponibilidad de la capacidad estimada de los medios de transporte.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^g X_{ijk}^{lpq} \leq T_{kpq} ; k \in 1:f, p \in 1:h, q \in 1:r$$

Restricción de tipo **IV**: Disponibilidad de la capacidad estimada de los equipos de alza.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^f \sum_{p=1}^h X_{ijk}^{lpq} \leq A_{lq} ; l \in 1:g, q \in 1:r$$

Restricción de tipo **V**: Disponibilidad de la capacidad estimada de las cosechadoras.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^f \sum_{p=1}^h X_{ijk}^{lpq} \leq C_{lq} ; l \in 1:g, q \in 1:r$$

Restricción de tipo **VI**: Producción conjunta mínima de azúcar.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^f \sum_{l=1}^g \sum_{p=1}^h \sum_{q=1}^r K \cdot R_q \cdot X_{ijk}^{lpq} \geq S$$

Restricción de *tipo VII*: Condición de no negatividad de las variables.

$$X_{ijk}^{lpq} \geq 0 ; i \in 1:n, j \in 1:m, k \in 1:f, l \in 1:g, p \in 1:h, q \in 1:r$$

Función objetivo:

$$\text{MIN } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^f \sum_{l=1}^g \sum_{p=1}^h \sum_{q=1}^r C_{ijk}^{lpq} X_{ijk}^{lpq}$$

Con la aplicación e instrumentación de estos modelos se hace un análisis integral del proceso de recolección de la caña de azúcar, ya que se consideran las actividades de: *corte mecanizado, alza, transporte, recepción y producción de la caña de azúcar*, enriqueciéndose las aplicaciones precedentes, lo que le da la novedad científica al trabajo.

La *solución de los modelos* utilizados se han obtenidos por medio de los paquetes de programas profesionales: LO (Linear Optimization) e HIPER LINDO (Linear, Interactive, Discrete, Optimizer); así como a través de los *software* diseñados para estos tipos de modelos, denominados OPTRANSC (Optimización del Transporte Cañero) y VINOP (Vinculaciones óptimas) elaborado bajo la asesoría del autor.

Procedimientos para determinar los parámetros y coeficientes fundamentales

Detallados los planteamientos matemáticos de los Modelos Económico-Matemáticos mostraremos los aspectos más relevantes a tener en cuenta para determinar los *parámetros* y *coeficientes* que deben utilizarse en el planteamiento y solución de los modelos. Solo se hace referencia a los coeficientes y parámetros donde se emplean métodos estadísticos y matemáticos.

Capacidad disponible estimada de los centros de recepción

El análisis estadístico utilizado en el estudio de la capacidad de los centros de recepción es la *Regresión Lineal Simple*, para determinar el mejor modelo se tienen en cuenta: *el coeficiente de determinación máximo*, *las pruebas de hipótesis t de Student y F de Fisher*; así como *las pruebas: d de Durbin-Watson y de Goldfed-Quandt*. El estudio estadístico se apoya en la aplicación de la computación por medios de los programas: *Statistica, Microstat, Ajuste y TSP*. Este análisis es válido para los indicadores *pol en caña* y *recobrado*.

Para determinar la *capacidad disponible estimada de los centros* se calcula previamente la *capacidad de aprovechamiento máxima del centro de recepción*, procediendo de la forma siguiente: se calcula el volumen de caña promedio decenal procesada en al menos cinco zafras, ajustando su comportamiento mediante la aplicación del *Método de los Mínimos Cuadrados*. Los modelos comprobados fueron de tipo: lineal, cuadrático, cúbico, exponencial y potencial. Los cuadráticos y cúbicos examinados exhiben coeficientes de determinación y correlación superiores al 0,81 y 0,90 respectivamente.

Seleccionar uno de estos dos últimos modelos para la proyección de la capacidad de los centros de recepción es válido, pero en la investigación se eligió *el modelo cuadrático ($Y = a + b X + c X^2$)*; por los *resultados satisfactorios obtenidos con la verificación de las pruebas estadísticas* y ofrecer la ventaja adicional de poseer una expresión con mayor grado de sencillez y facilidades de cálculo.

Como resultado de aplicar las pruebas de hipótesis *t de Student y F de Fisher* a todas las ecuaciones de regresión cuadrática obtenidas se comprobó que

existe una relación significativa entre las variables, y que son de buen ajuste para un nivel de significación del 0,05.

Por medio de las pruebas: *d de Durbin-Watson y de Goldfed-Quandt*, se ha comprobado que no existe autocorrelación y que existe homocedasticidad en las varianzas para un nivel de significación del 0,05. Siendo el modelo seleccionado el adecuado, y permitirá realizar las proyecciones correctas y eficientes de la capacidad de los centros de recepción.

Determinada la función matemática que mejor ajusta a los datos, se procede a determinar la decena de máximo aprovechamiento de las capacidades mediante el empleo del *cálculo diferencial*.

En tal sentido se deriva la función estimada y se iguala la primera derivada a cero, para hallar el punto crítico (X_0), es decir, la decena de máximo aprovechamiento de las capacidades.

Como la segunda derivada de la función (Y'') es menor que cero, para cualquier valor de X se puede afirmar que en X_0 la función alcanza su valor máximo.

Evaluando la función estimada para la decena óptima X_0 , o sea, $Y_{\max} = a + b X_0 + c X_0^2$, se obtiene la *capacidad máxima estimada del centro de recepción* (Y_{\max}) y se alcanza fundamentalmente durante las decenas correspondientes a los meses de febrero y marzo.

El procedimiento expuesto se puede generalizar de la forma siguiente:

$$Y = a + b X + c X^2$$

$$\frac{d_y}{d_x} = b + 2cX$$

Igualando a cero, $\frac{d_y}{d_x} = 0$, tenemos que:

$$b + 2cX = 0$$

$$X_0 = -\frac{b}{2c}$$

Por tanto, Y_{\max} , es igual a:

$$Y_{\max} = a + b X_0 + c X_0^2$$

donde: Y_{\max} - Capacidad máxima estimada.

X_0 - Decena de máximo aprovechamiento de las capacidades.

a, b, c - Coeficientes de la ecuación de capacidad estimada.

Con aplicar las expresiones de X_0 y Y_{max} , se obtiene el resultado deseado.

El aprovechamiento máximo de las capacidades productivas de los centros de recepción representan la producción óptima por unidad de tiempo que puede alcanzar el centro de recepción, si se utiliza eficiente y racionalmente, sin pérdida de tiempo y sin sobre explotación.

Conociendo el *aprovechamiento máximo de las capacidades productivas* se determina la *capacidad disponible estimada de los centros de recepción* para el período de tiempo deseado.

El estudio expresado ha sido aplicado a 52 centros de receptores de caña de diez centrales azucareros de la provincia Granma.

Costo unitario de transportación

Para calcular el costo en función de los modelos planteados y debido a las especificaciones del transporte en el sector, se clasificó el transporte en *propio* y *tarifado*.

Para utilizar los costos en que se incurre en el traslado de la caña, *por medios propios*, se considera que la *ecuación de la línea recta* expresa adecuadamente la relación funcional del costo de transportación a una distancia dada en dependencia de los gastos variables y fijos, o sea: $Y = a + b X$, donde: Y - costo de una unidad de carga a una distancia dada; X - distancia a que se transporta la unidad de carga; a - coeficiente de gasto fijo; b - coeficiente de gasto variable.

Para determinar los *coeficientes de gastos* se calcula el promedio en al menos cinco zafas anteriores, de los indicadores: *volumen de caña transportada; distancia media de una unidad con carga; gastos variables; gastos fijos y tráfico de carga realizada*.

El *coeficiente de gasto variable promedio* se obtiene dividiendo el gasto total promedio variable por el tráfico de carga total promedio realizado, y para el *coeficiente de gasto fijo promedio* se divide el gasto total promedio fijo por el volumen de caña total promedio transportada.

Determinado los valores constantes de a y b , y evaluando la *ecuación lineal del costo* ($Y = a + b X$) para el valor de la distancia existente entre un bloque y un centro de recepción, se obtiene el *costo de transportación de una unidad de carga a la distancia dada*.

Para determinar el grado de validez y confiabilidad del "costo total de transportación calculado a partir de la ecuación lineal del costo" en rela-

ción con el "costo total de transportación real", se aplica una *Prueba de Hipótesis Entre Medias*.

Se comprobó que las variables correspondientes a los costos reales y determinadas a partir de la ecuación lineal del costo se distribuyen según *t* de Student, no existiendo diferencia significativa entre los valores promedios de los costos, para un nivel de significación del 0,05. Además, se comprobó el supuesto de varianzas poblacionales desconocidas e iguales a partir de una prueba de *Hipótesis de Comparación de Varianzas*.

En la *transportación realizada con medios tarifados*, a partir de la tarifa a pagar, por tonelada de caña en dependencia de la distancia a recorrer, establecida por el MINAZ, se determinó la función matemática del costo de transportación, siendo el mejor ajuste el de la línea recta resultado de aplicar el Método de los Mínimos Cuadrados.

Las pruebas estadísticas utilizadas en el estudio del costo de los medios de transporte tarifados coinciden con las expuestas en la determinación de la *capacidad disponible estimada de los centros de recepción*; lográndose resultados satisfactorios.

Rendimiento industrial

Para utilizar el rendimiento en la planificación de las vinculaciones cañeras entre centrales colindantes, se expresa en función de indicadores de eficiencia tan importantes como la *Pol en caña* y el *recobrado*, y se calcula como:

$$\text{Rendimiento industrial promedio de la caña de la unidad productora } l \text{ en el central destinatario } q = \frac{\text{Pol en caña promedio de la unidad productora } l \text{ en el central de origen } q}{\text{Recobrado promedio en el central destinatario } q} = 0,96$$

Para determinar los indicadores *pol en caña* y *recobrado promedio* se procede como se muestra a continuación.

El análisis estadístico utilizado en el estudio de la Pol en caña promedio es la *Regresión Lineal Simple*, al igual que para el estudio de la capacidad de los centros de recepción.

Para determinar la pol en caña promedio, durante el período de zafra, se calcula inicialmente el promedio de la pol decenal en al menos cinco zafras anteriores al período que se planifica. Aplicando el Método de los Mínimos Cuadrados, se realiza un ajuste estadístico-matemático de los datos correspondientes a la pol promedio decenal, comprobándose los modelos de tipo: lineal, cuadrático, cúbico, exponencial y el potencial.

Los modelos cuadráticos y cúbicos analizados presentan coeficientes de determinación y correlación superiores a 0,83 y 0,91 respectivamente. El resto de los modelos en su generalidad presentan coeficientes de correlación inferiores a 0,40.

Al referirse a la conducta de la pol en caña se plantea que “este indicador tiene un comportamiento estadístico parabólico similar al rendimiento industrial en función del tiempo”¹; con respecto a los resultados obtenidos el autor de referencia expone: “...por lo regular, la parábola de segundo grado ofrece un coeficiente de correlación superior a 0,90 y las pruebas de hipótesis brindan resultados satisfactorios. Si el coeficiente de correlación fuese menor de 0,85 se ajusta con frecuencia la ecuación de la parábola cúbica, la cual debe mostrar un comportamiento estadístico más aceptable”.²

Teniendo en cuenta los criterios anteriores y los resultados obtenidos con la aplicación de la investigación durante varias zafras en centrales de la provincia Granma; a partir de los datos correspondientes a la pol en caña promedio decenal es factible ajustar una ecuación de segundo grado parabólica correspondiente a la función: $Y = a + bX + cX^2$; donde: Y - Pol en caña (porcentaje); X - Tiempo (unidades convencionales, decenas); a, b, c - Parámetros de regresión (siendo $c \leq 0$).

Se aplicaron pruebas de hipótesis F de Fisher, t de Student, y se comprobó que existe una relación significativa entre las variables para un nivel de significación del 0,05; resultando que las ecuaciones cuadráticas son significativas y de buen ajuste. Las pruebas: d de Durbin-Watson y de Goldfed-Quandt arrojaron buenos resultados. Dichas pruebas son válidas para el estudio del *recobrado*.

¹ A. Morales: *Programación y economía de zafra*.

² A. García;, A. Morales; y otros: *CAI Dirección de los complejos agroindustriales*.

Recobrado promedio

Aplicando al indicador recobrado los procedimientos estadístico-matemáticos explicados para determinar la pol en caña promedio, se determinó que el recobrado promedio decenal de al menos cinco años tiene un comportamiento estadístico parabólico en función del tiempo con elevados coeficientes de correlación, hasta de 0,96 y tendencia semejante a la curva de la Pol.

Determinada la función matemática que mejor ajusta a los datos reales en ambos indicadores se procede a calcular la pol en caña y recobrado promedio, como el cociente de dividir: el valor del área bajo la curva de la parábola cuadrada hallado a partir de la *integral definida*, y el tiempo de duración de la campaña azucarera. Procediendo de la forma siguiente:

La integral definida será,

$$\begin{aligned} & \mathbf{f_t f_t f_t} \\ & = a \int_{f_i}^{f_t} dx + b \int_{f_i}^{f_t} X dx + c \int_{f_i}^{f_t} X^2 dx \\ & \mathbf{f_i f_i f_i} \end{aligned}$$

La Pol en caña y Recobrado promedio, se calcula como,

$$\begin{aligned} \bar{Y} &= a \int_{f_i}^{f_t} dx + b \int_{f_i}^{f_t} X dx + c \int_{f_i}^{f_t} X^2 dx ; \text{ resolviendo se obtiene que,} \\ \bar{Y} &= \frac{a (f_t - f_i) + \frac{b}{2} (f_t^2 - f_i^2) + \frac{c}{3} (f_t^3 - f_i^3)}{f_t - f_i} \end{aligned}$$

donde: \bar{Y} - Pol en caña o Recobrado promedio en el período.

f_i - Fecha de inicio planificada de la zafra.

f_t - Fecha de terminación planificada de zafra.

$f_t - f_i$ - Números de decenas.

Los límites de la integral definida están determinados por las fechas de inicio y terminación del período de zafra.

Para calcular los valores de la pol en caña y el recobrado promedio existe una limitante, dado que la ecuación matemática no es posible evaluarla para

valores no cuantitativos de la fecha calendario (ejemplo: 2 de febrero, etc.), por lo que se crea un código convencional de fechas, para hacer corresponder dichas fechas con un número; cada día se representa por una décima.

La determinación de la **Capacidad disponible estimada de los Tipos de Transporte, de las Alzadoras y de Corte de las Cosechadoras** se hace a partir de un estudio exhaustivo del **indicador rendimiento** de cada uno de estos medios de corte, alza y tiro.

Además, en la metodología se expone cómo tratar la información de partida para determinar la *Producción estimada de cada bloque cañero* y la *Distancia entre los bloques y los centros*, así como los aspectos a tener en cuenta en la *Clasificación de los bloques* y de las *Vinculaciones cañeras*.

Los procedimientos utilizados en la determinación y comprobación de los parámetros y coeficientes, apoyado en Técnicas Matemáticas y Estadísticas le imprimen al trabajo solidez y una gran novedad científica.

Variantes de vinculaciones cañeras

Las vinculaciones cañeras constituyen el nexo imprescindible entre la agricultura productora de la gramínea y la industria extractora del azúcar, y representan la actividad económica principal que ejecuta el transporte agrícola en la agroindustria azucarera. Estas son realizadas básicamente dentro de un central azucarero; aunque no se puede descartar la necesidad que se impone en la actualidad durante el proceso de planificación de las campañas azucareras a las Delegaciones Provinciales y al Ministerio, de realizar revinculaciones entre los centrales azucareros colindantes de un macizo cañero.

Las vinculaciones cañeras en la metodología se clasifican en dos grandes grupos representadas por las variantes de vinculación siguientes:

Variante I: Vinculación de áreas cañeras **dentro** de un mismo central azucarero.

Variante II: Vinculación de áreas cañeras **entre** centrales azucareros colindantes.

En la variante II se presentan dos situaciones: **Situación A-** Vinculación **completa** de un central azucarero hacia otro u otros centrales colindantes; y **Situación B-** Vinculación **parcial** entre centrales azucareros colindantes.

Variantes de vinculación que se presentan en cada situación:

Situación A ⇒ **Variante II.1-** Vinculación de todo el macizo cañero de un central a otro colindante, y **Variante II.2-** Vinculación en la que participan al

menos tres centrales azucareros colindantes, donde la caña total de uno de ellos se distribuye entre los restantes.

Situación B ⇒ **Variante II.3-** Vinculación en la que participan al menos dos centrales azucareros, donde se redistribuyen parte de las áreas cañeras colindantes.

→ *La variante de vinculación I*, es la que normalmente se prevé en el proceso de planificación de zafras en el MINAZ, cuando existe un *adecuado equilibrio entre el potencial agrícola de la producción cañera y las capacidades disponibles de la industria*.

→ *Las variantes de vinculación de áreas cañeras entre centrales azucareros colindantes (Variante II) hay que verlas en dos momentos importantes*, a partir de 1982 con el proceso de organización del sistema empresarial del MINAZ. Primeramente: con la creación de los CAI se intensificó la introducción del progreso científico técnico en las producciones cañeras posibilitando en gran medida un incremento de los rendimientos agrícolas con el consiguiente crecimiento de los volúmenes de caña, generándose en muchos macizos cañeros un desbalance entre la producción agrícola y la capacidad industrial, dentro del período óptimo de zafra; dado por el *excedente de caña* y el *déficit de capacidad industrial*.

Un segundo momento se ha encontrado influenciado por la incidencia de un clima adverso y la escasez de recursos materiales, que han propiciado la disminución significativa de los volúmenes de caña, produciéndose un fenómeno de actualidad en la actividad agroindustrial azucarera, donde por un *lado existe déficit de caña* y por otro *suficiente capacidad industrial*. Por consiguiente, para lograr una mejor utilización de las capacidades instaladas de los centrales en funcionamiento se ha venido suscitando la necesidad de realizar *revinculaciones cañeras* como una medida organizativa a corto y mediano plazo.

Este problema objeto de análisis no se circunscribe a una sencilla distribución de áreas cañeras entre centrales en función de las capacidades de recepción de caña y la distancia a recorrer, como se hace con los métodos tradicionales; con la aplicación de la *metodología* que se expone se trata de *conjugar las ventajas de la eficiencia industrial con los menores costo de transportación, teniendo en cuenta los volúmenes de caña disponible y las capacidades de los medios de corte, alza, tiro y de molida de la industria*.

La utilidad práctica de la metodología se valida en las aplicaciones prácticas de los resultados a situaciones concretas de diez CAI de la provincia de Granma desde la zafra 1991-1992. A continuación se muestran

algunas aplicaciones teniendo en cuenta la variante de vinculación, el modelo económico-matemático empleado y el CAI objeto de estudio:

- En la **Variante I-** Se aplicó el **modelo I**, a los **CAI**: “Bartolomé Masó”, “Ranulfo Leyva”, “Arquímedes Colina”, “José N. Figueredo”, “Juan M. Márquez” y “Roberto Ramírez”.
- En la **Variante II.1-** Se aplicó el **modelo II**, a las vinculaciones entre los **CAI**: “José N. Figueredo” y “Grito de Yara”.
- En la **Variante II.2-** Se aplicó el **modelo II**, a las vinculaciones entre los **CAI**: “Enidio Díaz”, “La Demajagua” y “Francisco Castro”.
- En la **Variante II.3-** Se aplicó el **modelo II**, a las vinculaciones entre los **CAI**: “Ranulfo Leyva” y “Bartolomé Masó”.

En el período que abarca el presente trabajo se realizaron 23 aplicaciones prácticas, lo que demuestra el uso y seguimiento sistemático de la metodología; validando sus resultados en la práctica como consecuencia de realizar aplicaciones sucesivas.

Fundamentales resultados prácticos

Los resultados prácticos más relevantes que aporta la aplicación de la metodología desde el punto de vista económico, técnico y productivo, en relación con los obtenidos por los métodos tradicionales de planificación, se expresan a continuación:

- Se logra una disminución en el costo total de transportación en un rango entre el 9 y el 15 por ciento.
- Se logra una reestructuración más eficiente y racional de la vinculación de los bloques cañeros a los centros de recepción dentro y entre centrales, atendiendo al costo de transportación de los medios de transporte.
- La optimización de las vinculaciones cañeras genera un mejor balance de aprovechamiento de las capacidades de los centros receptores y una utilización racional y eficiente de los medios de transporte, de cosecha y alza mecanizada, lográndose un ahorro notable de estos.

- El aprovechamiento óptimo de las capacidades de los centros de recepción permite realizar el procesamiento de la caña con el 85 % de la capacidad disponible aproximadamente.
- Con las vinculaciones cañeras hacia los centrales con industria más eficientes se logra un crecimiento de la producción de azúcar superior a un 0,05 % y hasta un 5,40 % con respecto a la planificación inicial. Obteniéndose incrementos que oscilan entre 190 y 3 004 toneladas de azúcar, valorado a precios del Mercado Mundial es equivalente a un ingreso en divisa hasta de 360 000 USD.

Ventajas que genera la aplicación de la metodología

- En la elaboración y aplicación de la metodología se utiliza el *análisis sistémico*, que permite realizar un enfoque integral y completo en el estudio de los factores que influyen en las diferentes fases de las vinculaciones cañeras, y además posibilita concretar los elementos del sistema que van a ser representados en el modelo. Mediante el análisis sistémico es factible la interrelación de la definición cualitativa de los parámetros y las relaciones matemáticas del modelo aplicado.
- Los cambios que se operan en el orden técnico, productivo, económico y en la estructura organizativa de la agroindustria azucarera a nivel nacional, aparejados a la introducción de los avances de la ciencia y la técnica; exigen del *perfeccionamiento de los métodos de planificación, utilizados en la elaboración y fundamentación del balance de las actividades que participan en las vinculaciones cañeras. Esto se logra de manera eficiente mediante el empleo de las técnicas modernas de planificación que proporcionan los métodos y modelos económico- matemáticos expuestos en la metodología.*
- La utilización de los métodos y modelos económico-matemáticos que aporta la metodología y la aplicación de técnicas de cómputo electrónico, en la planificación de las vinculaciones cañeras y de las actividades de corte, alza, transporte y recepción, proporcionan cambios cuantitativos; que *permiten un análisis económico más depurado y completo, facilitando una amplia y clara valoración de los resultados, sobre la base*

de una información más exacta. Conduciendo a cambios cualitativos en la metodología de planificación.

- La metodología formulada *proporciona los procedimientos necesarios para tratar y preparar la información de partida* empleada en la solución de los modelos, lo que constituye una vía efectiva para la aplicación práctica de los resultados por parte del productor.
- La determinación y comprobación de varios parámetros y coeficientes de los modelos, tratados en la información de partida se realizan mediante la *utilización de la estadística matemática, del cálculo diferencial e integral y el empleo de las técnicas de computación.*
- Los modelos aplicados en la metodología con dimensiones hasta de 663 variables y 491 restricciones, y probados en varias estructuras organizativas del MINAZ con resultados técnico-productivos y económicos positivos; y con restricciones referentes a la producción de materia prima por bloques cañeros, meta mínima de producción de azúcar entre centrales vinculados y restricciones de capacidad de los medios de transporte, equipos de corte mecanizado, alza mecanizada y de los centros de recepción; *constituyen una contribución efectiva en la aplicación de los métodos y modelos económico-matemáticos al enriquecerse las aplicaciones realizadas en trabajos precedentes.*

Conclusiones

- 1- En la planificación de las vinculaciones predomina la aplicación de *métodos tradicionales* con un alto grado de empirismo que imposibilitan la fundamentación económica y técnica de las decisiones a tomar, desde el prisma científico.
- 2- La aplicación de técnicas de avanzada constituye una vía eficaz, para incrementar la *eficiencia económica* a través de la disminución de los costos totales de transportación y el aumento de los niveles de producción de azúcar por encima del plan.
- 3- La metodología aplicada representa un instrumento eficaz que *permite perfeccionar los métodos de planificación corriente y operativa* de la zafra; contribuyendo a la confección de variantes óptimas y a la toma de decisiones científicamente fundamentadas.

- 4- La metodología propuesta proporciona los procedimientos necesarios para *determinar los parámetros y coeficientes* utilizados en el planteamiento y solución de los modelos aplicados; constituyendo una vía efectiva para la implementación de los resultados por parte del productor.
- 5- Los resultados alcanzados con las vinculaciones óptimas de áreas cañeras entre los centrales colindantes hacia industrias más eficientes, muestran **un incremento en la producción conjunta de azúcar** entre el 0,05 y 5,40 % con respecto al plan.
- 6- Los resultados de los modelos aplicados han posibilitado una *reestructuración más eficiente de las vinculaciones* en función de los costos de los medios de transporte; lográndose *un beneficio económico*, al disminuir los costos totales de transportación hasta del 15 % con respecto al obtenido con los métodos convencionales de planificación.
- 7- Los resultados de las vinculaciones óptimas posibilitan un *mejor balance de aprovechamiento* de las capacidades instaladas de los centros de recepción; y una *utilización racional y eficiente* de las capacidades disponibles de los medios de corte, alza y tiro agrícola.

Bibliografía

- Bronson, R.: *Teoría y problema de investigación de operaciones*. McGraw-Hill, México, 1984.
- Dent, J.B., Harrison, S.R.: *Farm planning with Linear Programming: concept and practice*. Printed Australia, 1993.
- Dorfman, R.; Samuelson, P.A.; Solow, R.M.: *Programación lineal y análisis económico*. Edición Revolucionaria, La Habana, 1967.
- Eppen, G.D; Gould, F. J.: *Investigación de operaciones en la ciencia administrativa*. Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A, México, 1993.
- Felipe, P.; Rodríguez, B.; Ruiz, N.; González, L.; Morales, A.: *Programación Matemática*. Tomo I-II, Editorial del MES, La Habana, 1983.
- García, A.; Morales, A.; y otros: *CAI Dirección de los complejos agroindustriales*. Editorial Ciencias Sociales, La Habana, 1988.
- Garvin, W: *Introduction to Linear Programming*. Edición Revolucionaria, La Habana, 1970.
- Gass , Saul L.: *Programación Lineal*. Edición Revolucionaria, La Habana, 1971.
- Little, T.; Hill, J.: *Métodos estadísticos para la investigación en la agricultura*. Editorial Trillas, México, 1998.
- Morales, A.: *Programación y economía de zafra*. Editorial Ciencias Sociales, La Habana, 1993.
- Moskowitz, H.; Wright, G.: *Investigación de operaciones*. Prentice-Hall Hispanoamericana, México, 1982.
- Rodríguez, R.: *Métodos Económicos Matemáticos aplicados al transporte*. Tomo I. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1984.
- Roscoe, Davis; Mckeown, Patric.: *Modelos cuantitativos para la administración*. University of Georgia, Grupo Editorial Iberoamericano, 1991.
- Walpole R.E, Myers R.H: *Probabilidad y estadística para ingenieros*. McGraw-Hill, México, 1989.
- Partido Comunista de Cuba: *Resolución Económica del V Congreso del PCC*. Editorial Política, La Habana, 1997.