**AGROCENTRO 2019**

**IX Simposio de Ingeniería Agrícola**

**RACIONALIZACIÓN DEL COMPLEJO COSECHA-TRANSPORTE DE LA CAÑA DE AZÚCAR MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS.**

***RATIONALIZATION OF THE HARVEST COMPLEX-TRANSPORTATION OF THE SUGAR CANE THROUGH THE INTEGRATION OF MATHEMATICAL MODELS.***

Autores: Ing. Claudia Cruz Arredondo[[1]](#footnote-1). Email: claudiaca@unah.edu.cu. Teléfono: 47860306.

MsC. Yanara Rodríguez López [[2]](#footnote-2). Email: yanita@unah.edu.cu. Teléfono: 47860306.

**RESUMEN**

La presente investigación se realizó en la Unidad Empresarial de Base “Héctor Molina Riaño”, con el objetivo de determinar la conformación racional de los medios que intervienen en el proceso cosecha-transporte de la caña de azúcar mediante la integración de los modelos matemáticos: Teoría de Cola (estados simples y en cascada) y la Programación Lineal. Se determinó la estabilidad del complejo aplicando la Cadena de Markov; para esto se parte de la evaluación de los índices tecnológicos, económicos y de explotación de los elementos que conforman la brigada de cosecha, transporte y recepción de la caña de azúcar cosechando en campos con en un rendimiento agrícola de 22,08 t/ha. Se determinó con el empleo de la Teoría de Cola, que la cantidad racional de conjuntos de transporte para una distancia de 18 km utilizando dos (2) cosechadora es de tres (3) medios de transporte con un costo mínimo por paradas de 62,22 peso/h, cuya conformación fue validada con el empleo de la teoría de colas en cascadas agregando la existencia de 4 autobasculantes en el sistema. Con la aplicación de la Programación Lineal se determinó que se necesita uno (1) medio de transporte para serviciar a dos (2) cosechadoras teniendo un costo mínimo de 129,71 peso. Con la utilización del modelo de Cadenas de Markov se determinó que la conformación más estable fue la propuesta por la Teoría de Colas con una probabilidad de transición de 73,54% y de no transición de 20,46% para una afectación económica de 17,23 peso/h.

**Palabras claves:** Modelo Matemático, Caña de Azúcar, Medios de Transporte.

***Sumary:*** *The present investigation was carried out in the Base Business Unit "Héctor Molina Riaño", with the objective of determining the rational conformation of the media involved in the harvest-transport process of the sugarcane through the integration of the mathematical models: of Cola (simple and cascaded states) and Linear Programming. The stability of the complex was determined by applying the Markov Chain; This is part of the evaluation of the technological, economic and exploitation indexes of the elements that make up the harvest, transport and reception brigade of the sugarcane harvesting in fields with an agricultural yield of 22.08 t / ha. It was determined with the use of the Theory of Tail, that the rational amount of transport sets for a distance of 18 km using two (2) harvester is three (3) means of transport with a minimum cost per stop of 62.22 peso / h, whose conformation was validated with the use of the theory of tails in cascades adding the existence of 4 autobasculantes in the system. With the application of Linear Programming it was determined that one (1) means of transportation is needed to service two (2) harvesters with a minimum cost of 129.71 peso. With the use of the Markov Chains model it was determined that the most stable conformation was that proposed by the Theory of Tails with a probability of transition of 73.54% and non-transition of 20.46% for an economic impact of 17, 23 peso / h.*

***Keywords:*** *Mathematical Model, Sugar Cane, Means of Transport.*

**INTRODUCCIÓN**

La caña de azúcar es un cultivo de gran importancia a nivel mundial ya que constituye la principal fuente de azúcar en el mundo. Los mayores productores de azúcar son Brasil, China, Unión Europea (UE) e India, mientras que los principales países exportadores de azúcar son Brasil, Tailandia, Australia, India y Guatemala. Entre los mayores importadores de azúcar se encuentra la UE, Rusia, Estados Unidos (EE.UU), Indonesia y China, mercado que ha mostrado importantes aumentos en su consumo (IANSA, 2014).

En Cuba constituye un cultivo priorizado por lo cual constituye un eslabón fundamental en la agricultura. Desde la zafra 2001-2002 ha sufrido una gran disminución tanto en las áreas dedicadas a su cultivo, sus niveles de producción como de su rendimiento (ONEI, 2017). Por lo anterior planteado se ha intensificado la investigación científica, en este sector, en busca de optimizar su producción, disminuyendo los costos y aumentando los rendimientos, para así obtener mayores ganancias

Hoy son varios los factores que limitan el trabajo del complejo mecanizado cosecha–transporte–recepción de la caña de azúcar, estos inciden negativamente en la posibilidad de incrementar la productividad del mismo utilizando el transporte por camiones (Medina, 2017). En busca de aumentar la producción se viene trabajando hace varios años en la optimización del proceso cosecha-transporte de la caña de azúcar. Para esto se han estudiado las principales afectaciones en el proceso y se han identificado entre ellas los tiempos de esperas ocurridos en las diferentes partes del ciclo productivo y la conformación ideal del complejo cosecha-transporte en dependencia del rendimiento agrícola presente en el campo. Por lo cual surge la necesidad de investigar la composición racional del complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar mediante la integración de modelos matemáticos, con el propósito de lograr una mayor estabilidad y obtener ventajas económicas en el mismo.

En correspondencia con lo planteado, la presente investigación tiene como **objeto de estudio**: el complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar. Teniéndose como **problema científico:** Deficiente organización del complejo de máquinas que intervienen en el proceso de cosecha-transporte de la caña de azúcar, lo cual propicia elevadas pérdidas económicas y de tiempo productivo. Para la solución del problema científico planteado se formula la siguiente **Hipótesis:** A través de la integración de modelos matemáticos es posible racionalizar la estructura del complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar, propiciando un efecto económico y tecnológico positivo. A partir de la problemática a resolver se establece el siguiente **objetivo general:** Determinar la estructura racional del complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar mediante la Programación Lineal, Teoría de Cola (estaciones simples y múltiples) y el modelo de Markov.

**Tareas de la investigación:**

* Determinación de la racionalización del complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar mediante la Programación Lineal.
* Determinación de la racionalización del complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar mediante la Teoría de Cola (estaciones simples y múltiples).
* Determinación de la estabilidad del complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar a través del modelo de Markov.

**Materiales y métodos**

Teoría de cola para una estación única de servicio.

Este método de cálculo para la organización en flujo de la producción es clásico, y presenta la posibilidad de obtener una misma magnitud de la productividad de cualquier conjunto componente del flujo, durante el período de tiempo observado. Como se conoce que el trabajo de la mayoría de los conjuntos agrícolas es cíclico y la productividad es constante en iguales condiciones de producción, es posible predeterminar el tiempo de cada ciclo. Por ejemplo el tiempo de recorrido de los medios de transporte y el tiempo de entrega del producto durante su recepción.

Económicamente es conveniente que la relación entre la cantidad de cosechadoras y los medios de transporte durante el proceso cosecha, sea la mínima necesaria [Ramírez et al, 1993]. Este criterio se logra con la función objetivo:

, peso/h (1)

donde**:**

Cpc, Cpt - costo horario por paradas de la cosechadora y de los medios de transporte, peso/h;  número medio de servidores (medios de transporte) que llegan o entran al sistema de servicio masivo o sistema de espera en una unidad de tiempo, h-1; Tiempo medio de espera de cada solicitud de la cosechadora, h; Cantidad de medios de transporte para el serviciaje de un grupo de cosechadoras; Pcola-probabilidad de que una unidad arribe al sistema y tenga que esperar o sea la probabilidad de que exista una cola tanto de los medios de transporte por las cosechadoras, como de las cosechadoras por los medios de transporte.

Es posible determinar la probabilidad de que dos o más entradas (cosechadoras) soliciten servicio al mismo tiempo mediante la siguiente expresión:



 (2)

donde**:**

C- cantidad de cosechadoras que intervienen en el proceso.

 (3)

donde**:**

Cantidad de medios de transporte que existen en dicho eslabón (canales de servicio existentes en el sistema).

La probabilidad de que exista una cola tanto de los medios de transporte por las cosechadoras, como de las cosechadoras por los medios de transporte, se determina de la siguiente manera:



 (4)

Teoría de cola para estaciones consecutivas o de cascadas.

Por el sistema tradicional de cálculo se puede obtener la cantidad de medios de transporte, pero es imposible determinar la cantidad media de cosechadoras en cola para ser serviciadas, y la duración media del tiempo de espera de los medios de transporte. Por esta causa evaluar las pérdidas por las paradas de las cosechadoras no es posible por una u otra comparación cuantitativa del eslabón de transporte; por lo que el complejo cosecha–transporte se subordina a un proceso de servicio masivo. Para esto se calculan las siguientes probabilidades:

Probabilidad de que no halla unidades en el sistema**.**

$P\_{o}=\frac{1-ρ}{(1-ρ)^{M+1}}$ . (5)

Probabilidad de que haya n unidades en el sistema**.**

$P\_{n}=\frac{(1-ρ)}{(1-ρ)^{M+1}}∙ρ^{n}=Po∙ρ^{n}$ para n =1, 2.....M (6)

Número medio de unidades en el sistema.

$L=\frac{ρ}{1-ρ}-\frac{(M+1)∙ρ^{M+1}}{(1-ρ)^{M+1}}$ (7)

Número medio de unidades en la cola**.**

$L\_{q}=L-(1-P\_{0})$ (8)

Tiempo medio de estancia de una unidad en el sistema**.**

$W=\frac{L}{\overbar{λ}}$ ; h (9)

donde**:**

$\overbar{λ}=λ×\left(1\mp P\_{M}\right)$ (10)

PM: probabilidad de que un cliente arribe al sistema y no se pueda incorporar.

Tiempo medio de estancia de una unidad en la cola.

$W\_{q}=\frac{Lq}{\overbar{λ}}$ ; h (11)

donde**:**

Lq: Número medio de unidades en la cola.

Probabilidad de que una unidad acuda al sistema y tenga que esperar**.**

$P\left(t>0\right)=\sum\_{n=1}^{M-1}P\_{n}$ (12)

Fracción de clientes potenciales que se pierden. Probabilidad de que 1 cliente arribe al sistema y no se pueda incorporar.

$P\_{M}=1\mp \sum\_{n=0}^{M-1}Pn=Po∙ρ^{M}$ (13)

## Metodología para la determinación de la racionalización de los medios que intervienen en el proceso cosecha–transporte con el empleo de la Programación Lineal.

La programación lineal es un procedimiento o algoritmo matemático mediante el cual se resuelve un problema indeterminado, formulado a través de un sistema de inecuaciones lineales, optimizando la función objetivo, también lineal.

1. Primeras restricciones para asegurar el cumplimiento del volumen total de trabajo, para todos los períodos.

 k=1…K (14)

donde:

i - índice del tipo de transporte; j - índice del tipo de remolque;k - índice de la labor de transporte; t - índice de la distancia de transportación; b k - volumen dado de trabajo; I -Cantidad de medios de transporte (KAMAZ); J - Cantidad de remolques; T - Distancia de transportación.

1. El segundo grupo de restricciones, para determinar la cantidad racional de medios de transporte a utilizar en la brigada de cosecha:

 i=1…I (15)

donde**:**

Wt– productividad del medio de transporte, t/h; Tc - tiempo de ciclo de transportación; h; Q- Volumen de producción, t; K - Cantidad de ciclos de transportación a realizar.

Esta restricción incluye a todos conjuntos de transporte para determinar la cantidad necesaria de los mismos.

1. Es necesario incluir una restricción para que la cantidad de cosechadoras sea igual a uno.
2. Condición de no negatividad.

 (16)

La función objetivo en este modelo se describe de la siguiente forma:

MIN Z =  (17)

donde:

Cexp – Costos de explotación por tonelada cosechada y transportada con el medio de transporte (i) KAMAZ con remolque *(*j) en la transportación, donde se incluyen los costos por salario, combustible y lubricantes.

, peso/h (18)

donde:

Costos Fijos (Cf). Son aquellos que no dependen del uso de la maquinaria y están conformadas por la depreciación (Cd). La misma se determina de la siguiente manera:

**Modelo de Markov para racionalización de la brigada cosecha - transporte.**

Para el análisis de la estructura racional del complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar empleando el modelo de Markov, se parte de que es un proceso estocástico, pues varía en el tiempode una manera probabilística, lo cual no es más que una sucesión de observaciones y los valores de estas no se pueden predecir exactamente. Para dicho modelo se tiene en cuenta que los estados que forman el proceso son: caña de azúcar en cosecha Ec, caña de azúcar en transporte E**t** y caña de azúcar en el centro de recepción Er y la cantidad de medios de transporte necesarios se obtiene por el método determinista y se combina con los criterios de probabilidad de transición provenientes de la matriz elaborada.

Con el objetivo de formar la matriz de transición se debe determinar la probabilidad de transición o no transición de un estado a otro a través de las tabla de Poisson, para esto se tienen las observaciones realizadas a la cola de los camiones en el central y se determina la esperanza matemática para la cosecha $λ$c y el transporte $λ$t (expresión 41 y 42).

Para la cosecha se determina a partir del coeficiente de disponibilidad técnica de la misma:

$λ\_{c}=n\_{c}\*k\_{d\_{c}}$ (19)

donde:

$n\_{c}$- número de cosechadoras;

Para el transporte se tiene en cuenta además de la disponibilidad técnica de los mismos:

$λ\_{t}=n\_{t}\*k\_{dt}$ (20)

donde:

$n\_{t}$- número de camiones;

Teniendo $λ$c,$λ$t, y K (número de camiones a observar) para la cosechadora y el transportese pueden determinar las probabilidades de transición a través de las tabla de Poisson .

Para determinar la probabilidad de transición (Pt) y no transición (Pnt) del central se hicieron 15 observaciones que se promediaron determinando el número de camiones en espera para entregar el producto (ncer) y el total de camiones en el centro de recepción (ntr);

$P\_{nt}≡\frac{n\_{cer}}{n\_{tr}}$ (21)

Teniendo en cuenta las probabilidades de no transición se puede obtener las probabilidades de transición:

$P\_{t=}1-P\_{nt}$ (22)

Mediante lo antes expuesto se puede determinar la matriz de transición de un estado a otro:

$\begin{matrix}E\_{c}\\E\_{t}\\E\_{r}\end{matrix}\begin{array}{c}\begin{matrix}E\_{c}&E\_{t}&E\_{r}\end{matrix}\\\left(\begin{matrix}P\_{nt}&P\_{t}&0\\0&P\_{nt}&P\_{t}\\P\_{t}&0&P\_{nt}\end{matrix}\right)\end{array}$ (23)

Basado en el análisis anteriormente realizado se puede obtener una estimación de la afectación económica por la rotura del ciclo Cpet a parir de la determinación de los costos por paradas en cada elemento del ciclo y la probabilidad de que no se transite de un estado a otro del mismo.

$C\_{pet=}\left(C\_{pc}\*P\_{ntc}\right)+\left(C\_{pt}\*P\_{nt\_{t}}\right)+\left(C\_{pcr}\*P\_{nt\_{r}}\right);peso/h$ (24)

donde:

Cpc, pt y Pcr- costo por parada en la cosecha, transporte y centro del recepción del central respectivamente; peso/h

**RESULTADOS**

Mediante los resultados obtenidos se formó la matriz de transición 25, que representa para el caso del estado de Caña en Transporte la cantidad obtenida del modelo de Teoría de Cola en estado simple y en cascada. En el estado de caña en cosecha la probabilidad de transición es de 73% y la de no transición es de 27%, siendo para caña en transporte de 20,46% la de no transición y 73,54% la de transición, en el caso de la recepción 41% la de transición y 59% la de no transición.

$\begin{matrix}E\_{c}\\E\_{t}\\E\_{r}\end{matrix}\begin{array}{c}\begin{matrix}E\_{c}& E\_{t}& E\_{r}\end{matrix}\\\left(\begin{matrix}0,2700&0,7300&0\\0&0,2046&0,7354\\0,4100&0&0,5900\end{matrix}\right)\end{array}$ (25)

Mediante los resultados obtenidos empleando la programación lineal se formó la matriz de transición 3.2. En el estado de caña en cosecha la probabilidad de transición es de 73% y la de no transición es de 27%, siendo para caña en transporte de 36.59% la de no transición y 62,41% la de transición, en el caso de la recepción 41% la de transición y 59% la de no transición.

$\begin{matrix}E\_{c}\\E\_{t}\\E\_{r}\end{matrix}\begin{array}{c}\begin{matrix}E\_{c}& E\_{t}& E\_{r}\end{matrix}\\\left(\begin{matrix}0,2700&0,7300&0\\0&0.3659&0.6341\\0.4100&0&0.5900\end{matrix}\right)\end{array}$ (26)

Luego de tener definidas las matrices de transición se determinó la afectación económica por rotura de los diferentes ciclos que representan las diferentes conformaciones del complejo cosecha-transporte de la caña de azúcar, los mismos se pueden observar en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Comparación de estabilidad y afectación económica de los modelos empleados.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Modelo matemático | nmt | $$C\_{pet }$$ |
| Programación Lineal | 1 | 20,82 |
| Teoría de cola en estado simple | 3 | 17,23 |
| Teoría de cola en estado múltiple | 3 | 17,23 |

Al comparar los resultados de transición, no transición y costo económico de los diferentes modelos se puede observar que la composición más estable es la resultante de la aplicación de la teoría de colas, tanto en estado simple como en cascadas, teniendo estos una probabilidad de transición de 73,54% y de no transición de 20,46%, al igual que el menor costo económico que fue de 17,23 peso teniendo una diferencia de la Programación Lineal de 3,59 peso.

**CONCLUSIONES**

* Con el empleo de la Teoría de Cola simple se determinó que para dos (2) cosechadoras la cantidad racional de medios de transporte es de tres (3) con un costo mínimo por paradas de 69,22 peso/h.
* Mediante la Teoría de Cola en cascadas se obtuvo que la brigada debe estar conformada por dos (2) cosechadoras, cuatro (4) autobasculantes y tres (3) medios de transporte con un costo mínimo por paradas de 69,22 peso/h.
* Con el empleo de la Programación Lineal la brigada debe estar conformada por dos (2) cosechadoras y uno (1) medio de transporte obteniendo una pérdida económica mínima de 129,71 peso para el volumen de producción realizado.
* La conformación más estable empleando el modelo de Cadenas de Markov con una probabilidad de transición de 73,54% y una de no transición de 20,46%, además de una afectación económica de 17,23 peso/h fuel la obtenida utilizando las variantes de la Teoría de Colas de dos (2) cosechadoras, cuatro (4) autobasculantes y tres (3) medios de transporte.
1. Ingeniera Agrícola. Universidad Agraria de La Habana, Facultad Ciencias Técnicas, Departamento de Ingeniería Agrícola. [↑](#footnote-ref-1)
2. Profesor Auxiliar Universidad Agraria de la Habana, Facultad Ciencias Técnicas, Departamento de Ingeniería.

Dirección: Autopista Nacional km 23 ½ y carretera de Tapaste, Mayabeque, Cuba. [↑](#footnote-ref-2)