

Herramienta para evaluar el efecto de la calidad de la materia prima y las variables de operación del proceso, sobre la eficiencia industrial y la calidad del azúcar

Mauricio Ribas-García^{1*}, Leopoldo Rostgaard-Beltrán¹, Abel Verdecia-Fonseca¹, José L. Donald-Rodríguez¹, Raúl J. Sabadí-Díaz¹, Armando Rodríguez-González², Guillermo Martín-Abreu²

1. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA)
Vía Blanca, No. 804 y Carretera Central, San Miguel del Padrón. La Habana, Cuba.

* mauricio.ribas@icidca.azcuba.cu

2. Organización Superior de Desarrollo Empresarial (OSDE), AZCUBA
23 y N, Vedado. La Habana, Cuba.

RESUMEN

Introducción. Herramienta útil a cualquier empresa azucarera para actuar, de acuerdo con decisiones informadas, sobre los factores que más inciden en los resultados de eficiencia y calidad del azúcar, lo que contribuye a mejorar esos indicadores.

Objetivo. Disponer de una herramienta de análisis de proceso, basada en el aprendizaje automatizado (machine learning), orientada a mejorar la toma de decisiones informadas.

Materiales y métodos. Se construyó una matriz con información, de 77 indicadores por cada central azucarero, indicadores expresados como promedios ponderados según la caña molida y medidos en unidades de porcentaje, con la técnica de regresión lineal múltiple, combinada con un algoritmo de selección de variables, implementada en la herramienta de software Statgraphics Centurion XVII 17.2.

Resultados y discusión. Los modelos de aprendizaje automatizado (machine learning) obtenidos permitieron identificar y cuantificar el efecto independiente de los factores con mayor influencia sobre la eficiencia industrial y la calidad del azúcar. Un aumento de la pureza del jugo primario, del 82 al 85 %, significaría producir 14 456 toneladas de azúcar adicionales, base 96, con la misma cantidad de caña molida, lo que representaría 429 531 128.00 CUP por la venta de esa azúcar. Por otra parte, incrementar la extracción del jugo mezclado, del 72 al 90 %, implicaría producir 36 869 toneladas de azúcar adicionales, base 96, lo que representaría un ingreso de 1 075 579 337.00 CUP.

Conclusiones. Si el central A-8 incrementara la pureza del jugo primario del 80.73 al 90 %; entonces se producirían, por este concepto, 2062 toneladas de azúcar adicionales, que representarían un ingreso de 61 268 206.00 CUP.

Palabras clave. Producción de azúcar, eficiencia industrial, aprendizaje automatizado, calidad del azúcar, rendimiento industrial, análisis de proceso.

ABSTRACT

Introduction. A useful tool for any sugar company to make informed decisions about the factors that most impact sugar efficiency and quality, helping to improve these indicators.

Objective. To provide a process analysis tool based on machine learning, aimed at improving informed decision-making.

Materials and methods. A matrix was made with information from 77 indicators for each sugar mill, indicators expressed as weighted averages according to the cane ground and measured in percentage units,

using the multiple linear regression technique, combined with a variable selection algorithm, implemented in the Statgraphics Centurion XVII 17.2 software tool.

Results and discussion. The machine learning models obtained made it possible to identify and quantify the independent effect of the factors with the greatest influence on industrial efficiency and sugar quality. An increase in the purity of the primary juice, from 82 % to 85 %, would mean producing 14,456 tons of additional base 96 sugar with the same amount of ground cane, which would represent 429,531,128.00 CUP from the sale of that sugar. On the other hand, increasing the extraction of mixed juice from 72 % to 90 % would mean producing 36,869 tons of additional base 96 sugar, which would represent a revenue of 1,075,579,337.00 CUP.

Conclusions. If the A-8 sugar mill were to increase the purity of its primary juice from 80.73 % to 90 %, then 2,062 additional tons of sugar would produce representing an income of 61,268,206.00 CUP.

Keywords. Sugar production, industrial efficiency, machine learning, sugar quality, industrial performance, process analysis.

INTRODUCCIÓN

En Cuba, el rendimiento industrial y el recobrado son los indicadores que, tradicionalmente, se utilizan para identificar la eficiencia industrial azucarera (1- 4). En la literatura aparecen diferentes trabajos que abordan el tema de mejorar la productividad y eficiencia de la agroindustria azucarera (1- 4). Uno de los aspectos que más está influyendo en los resultados de la industria es el alto tiempo que transcurre entre cortar los campos y trasladarlos hacia los centros de limpieza (transporte por ferrocarril, falta de combustible, roturas que se dilatan en el tiempo por falta de piezas de repuesto o su llegada al pelotón, problemas organizativos y de productividad del trabajador). Esto tiene un impacto importante sobre la frescura de la caña que se está procesando, entre otros parámetros de calidad.

En los últimos años se ha extendido, con buenos resultados, el uso de técnicas de inteligencia artificial como las del aprendizaje automatizado o machine learning, para optimizar el proceso de producción de azúcar (5, 6).

En este trabajo se desarrolla una herramienta de análisis de proceso, basada en las técnicas del aprendizaje automatizado, que se aplica a datos de la industria azucarera cubana, dirigida a identificar y cuantificar, de forma independiente, el efecto que tienen la calidad de la caña y las variables de operación del proceso sobre la eficiencia industrial y la calidad del azúcar.

El objetivo del trabajo es evaluar el impacto de estos factores sobre la producción de azúcar y los ingresos de la empresa. Se analizan los centrales con peor comportamiento industrial y se evalúa, económicamente, lo que le representaría al central mejorar los indicadores industriales identificados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar este estudio se construyó una matriz con información de 77 indicadores por cada central azucarero. Los indicadores están expresados como promedios ponderados, según la caña molida y medidos en unidades de porcentaje.

Se empleó la técnica de regresión lineal múltiple, combinada con un algoritmo de selección de variables, paso a paso, implementada en la herramienta de software *Statgraphics Centurion XVII* 17.2 (*Statpoint Inc.*, Virginia, EE.UU., 2016) (7, 8).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la calidad de la materia prima entrada a fábrica

La tabla 1 muestra una comparación del comportamiento de algunos indicadores, relacionados con la calidad de la caña molida y valores considerados como posibles de alcanzar con la tecnología existente.

Tabla 1. Resultados de calidad de la materia prima

Variables	UM	Valor normal	Prom.	Min.	Max.	CV (%)
Pol caña	%	< 12	8.53	6.16	11.55	14
Fibra caña	%	13 - 15	17.17	15.66	19.20	6
Mat. Ext.	%	≥ 8	11.43	6.87	16.93	22
Caña atrasada	%	≥ 15	42.05	0.00	81.66	58
Caña quemada	%	≥ 10	14.88	1.74	47.77	87
Pza. jp	%	≤ 85	82.32	77.50	86.52	3
Brix jp	%	≤ 20	17.91	16.70	19.28	4
Ext. Jm	%	≤ 95	69.99	51.17	100.43	15
Pza. jm	%	≤ 84	81.28	76.18	85.68	3
Rpc	%	≤ 11	9.72	8.55	10.75	5
Anp	%	≤ 80	29.47	10.54	44.02	30
Rend b96	%	≤ 10	6.12	4.07	9.15	19

Mat. ext., contenido de materia extraña; Pza. jp, Pureza del jugo primario; Brix jp, Brix del jugo primario; Ext. jm, Extracción del jugo mezclado; Pza. jm, Pureza del jugo mezclado; Rpc, Rendimiento potencial de la caña; Anp, Aprovechamiento de la norma potencial; Rend. B96. Rendimiento base 96.

Se observa un elevado porcentaje de caña atrasada (42.05 %), que ha llegado a alcanzar un máximo de 81.66 %, esto tiene correlación directa con las bajas purezas de los jugos (Pza jp), altos valores de litros de miel / t de caña molida y altos niveles de dextrana.

Otra variable de interés es el Brix del jugo primario (Brix jp), parámetro que mide los sólidos solubles entrados a fábrica, que promedian 17.91 %, muy por debajo de 20 %, considerado como valor normal. Están también las bajas purezas (Pza jp) con 82.32 %, como media nacional en el jugo primario, pero existen centrales que no llegan ni al 80 %, como promedio, en este indicador.

Elevados porcentajes de materias extrañas (Mat ext), que influyen en la fibra en caña e inciden, directamente, en la extracción del jugo mezclado (Ext jm) y culmina en las pérdidas de bagazo (9.91 %). Este comportamiento se explica por diferentes causas: alto enyerbamiento en los campos de caña, falta de herbicidas, existencia de plantas invasoras, poca atención cultural a los cultivos, demora entre cosecha y corte de la caña y mala calidad en la cosecha.

El bajo aprovechamiento de la norma potencial, al 30 %, y pérdida de tiempo industrial, causado por roturas imprevistas o predichas, falta de recursos o malas operaciones, todo lo anterior muestra un mal comportamiento industrial, que limita mucho el potencial del recobrado para alcanzar la calidad del azúcar.

En la tabla 2 se identifican los cinco centrales con comportamiento no satisfactorio, de cuatro indicadores de calidad de la materia prima procesada. Estos centrales se caracterizaron por presentar más del 70 % de la caña molida atrasada, lo que incidió directamente en que las purezas del jugo primario fueran inferiores al 80 %. En el caso de A-2 y A-3 se unió el alto porcentaje de caña quemada procesada, que superó el 36 %.

Los centrales A-9, A-10, A-11, A-12 y A-5 reportaron altos contenidos de materias extrañas, que superaron el 14 %.

Tabla 2. Centrales con comportamiento no satisfactorio en los indicadores de calidad de la materia prima entrada a fábrica

Centrales	Orden	Caña atrasada	Centrales	Orden	Pza. jp
A-1	1	81.66	A-2	1	77.50
A-2	2	73.57	A-1	2	78.81
A-3	3	72.87	A-5	3	79.11
A-4	4	71.09	A-13	4	79.87
A-5	5	70.32	A-6	5	80.33

Centrales	Orden	Caña quemada	Centrales	Orden	Mext
A-6	1	47.77	A-9	1	16.93
A-2	2	36.72	A-10	2	16.64
A-3	3	35.90	A-11	3	15.30
A-7	4	35.72	A-12	4	15.09
A-8	5	35.39	A-8	5	13.91

Análisis de la eficiencia industrial

Las bajas purezas del jugo que entra a fabricación limitan mucho el potencial del recobrado (68.32 %) y la calidad del azúcar. Existe una diferencia de 11 unidades entre recobrado y recobrado norma y diferencia de 17 unidades entre recobrado y un valor considerado como normal (85 %)

Se observa un alto valor de pérdidas de mieles 15.98 %, afectado no solo por las bajas purezas en los jugos, que también influyen en la cantidad de miel a obtener y menos producción de azúcar, sino también por su formación en el proceso, debido a la alta retención y problemas de operación del proceso, que lo lleva a un estado de fuera de control. Una industria paralizada horas y días con materiales en proceso de bajo pH y altas temperaturas provoca que la sacarosa se descomponga y aumente la formación de miel (superior al 140 %).

Llama la atención la alta variabilidad que presentan las pérdidas indeterminadas (Perd ind), con un coeficiente de variación (Cv) del 120 %, que alcanzan un valor máximo de 24.15 %, cuando estas deben ser inferiores a 1 %.

Tabla 3. Resultados de la eficiencia industrial

Variables	UM	Valor normal	Prom.	Min.	Max.	CV (%)
Aprov rpc	%	≤ 90	62.79	40.21	88.98	5
Recobrado norma	%	≤ 85	78.98	71.85	84.70	4
Recobrado	%	≤ 85	68.32	45.67	80.42	13
Perd. bagazo	%	≥ 5	9.91	6.05	16.20	26
Perd. cachaza	%	> 1	1.62	0.45	3.50	47
Perd. ind.	%	> 1	4.17	1.04	24.15	120
Perd. mieles	%	≥ 8	15.98	9.05	29.03	29
Pza. miel B	%		48.23	49.82	66.20	9
lt MB / t caña	-	≈ 25	42.46	22.70	92.20	36
Formación de miel	%	≈ 110	143.46	111.94	290.24	26

Aprov rpc, Aprovechamiento del rendimiento potencial de la caña; Recobrado norma, Valor norma del recobrado; Recobrado, Porcentaje de azúcar recobrada industrialmente; Perd bagazo, Porcentaje de azúcar en el bagazo; Perd cachaza, Porcentaje de azúcar en la cachaza; Perd ind, Pérdidas indeterminadas; Perd mieles, Pérdidas en mieles; Pza miel B, Pureza de la miel B; Formación miel. Formación de miel.

En la tabla 4 se identifican 6 centrales que reportan pérdidas en bagazo, superiores a 13 %, más del doble de lo que se considera un valor normal (5 %). Existen 6 centrales que acumulan un promedio de pérdidas en miel final superior al 20 %, 5 centrales con recobrado industrial inferior al 60 % y 5 centrales en los que la formación de miel supera el 178 %.

Los centrales A-11, A-2 y A-14 repiten entre los que tienen mayores pérdidas industriales y, por tanto, menor recobrado.

Tabla 4. Centrales con comportamiento no satisfactorio en los indicadores de eficiencia industrial

Centrales	Orden	Perd. Bzo.
A-14	1	16.20
A-15	2	15.85
A-10	3	14.92
A-4	4	13.29
A-17	5	13.00
A-11	5	13.00

Centrales	Orden	Perd. MF.
A-2	1	29.03
A-187	2	22.46
A-11	3	22.28
A-3	3	22.28
A-19	4	20.27
A-20	5	20.01

Centrales	Orden	Form. miel
A-14	1	290.24
A-11	2	213.25
A-3	3	192.13
A-23	4	179.69
A-2	5	178.86

Centrales	Orden	Reco.
A-14	1	45.67
A-2	2	47.54
A-15	3	53.46
A-11	4	57.50
A-19	5	59.91

Análisis de la calidad del azúcar

El análisis de la calidad del azúcar producido revela que el promedio de Pol en azúcar es de 98.84 %, por debajo del valor normado de 99 %; el color promedia alrededor de 1367 UI y existe un grupo de centrales que superan los 1600 UI en el color en azúcar, valor que expresa deterioro; la dextrana promedia 450 ppm, las partículas ferromagnéticas en el azúcar promedian 23.35 ppm y el tamaño del grano 61 %, lo que incumple las normas establecidas (tabla 5). En esto influye el mantenimiento al equipamiento del área, el uso adecuado de los imanes para la extracción de partículas ferromagnéticas en el azúcar, la calidad de la materia prima procesada, mucha caña atrasada, lo que provoca que el grano no crezca, se alargue y se fragmente en las centrifugas continuas, además de las deficiencias en la operación de cristalización.

Los parámetros más afectados, en cuanto a la calidad del azúcar, son: partículas ferromagnéticas, tamaño de grano, dextrana, polarización y color.

Tabla 5. Resultados de la calidad del azúcar hasta el cierre de abril del 2024

Variables	UM	Norma	Prom.	Min.	Max.	CV (%)
Pol	%	99.00	98.84	97.99	99.26	0
Color	Hc	13.00	13.67	8.28	28.34	41
Humedad	%	0.20	0.25	0.11	0.58	53
Dextrana	Ppm	300.00	450.27	86.00	920.00	54
Part. Ferro	Ppm	6.00	23.35	1.12	78.37	100
Tamaño grano	%	60.00	61.03	45.00	77.00	10

Modelos de regresión lineal múltiple

Para cuantificar el efecto de los principales factores que influyen sobre el recobrado y el rendimiento industrial se empleó la técnica de aprendizaje automatizado, conocida como regresión lineal múltiple. Se lograron identificar modelos con una buena capacidad de predicción, que explican un alto porcentaje de la variabilidad de los datos contenidos en las las respuestas (tabla 6). En la figura 1 se observa una buena correspondencia entre las predicciones de los modelos y los valores observados.

El modelo de regresión 1 (tabla 7) explica alrededor del 90 % de la variabilidad contenida en los datos del rendimiento industrial, con un error estándar de estimación de 0.125 %.

La pureza del jugo primario está directamente correlacionada con la calidad de la caña molida y es la variable que tiene mayor peso sobre el rendimiento industrial (0.173), seguida de la extracción del jugo mezclado (Ext jm 0.068) y la formación de miel (Form miel 0.0065). Por cada unidad porcentual de incremento de la Pza jp el rendimiento aumenta, aproximadamente, 0.173 unidades y mantiene constantes las otras variables. Y, por cada unidad de incremento en la extracción del jugo mezclado, el rendimiento industrial aumenta en 0.068 unidades. Una unidad de incremento de la formación de miel hace que el rendimiento disminuya en 0.0065 unidades, lo que mantiene constantes las otras variables del modelo.

El modelo de regresión 2 (tabla 7) explica alrededor del 82 % de la variabilidad contenida en los datos del recobrado industrial, con un error estándar de estimación de 1.4 %. En este caso, la variable de mayor peso es la pureza del jugo primario (1.116), seguida de la extracción del jugo mezclado (0.221), la caña quemada (-0.085) y el aprovechamiento de la norma potencial (0.065).

El modelo de regresión 3 (tabla 7) muestra el efecto que tienen algunas variables como la fibra en caña y el agua de imbibición sobre la extracción del jugo mezclado. Por cada unidad de incremento de la fibra en caña, la extracción del jugo mezclado disminuye en, aproximadamente, una unidad y mantiene constantes las otras variables. Por otra parte, por cada unidad de porcentaje que se incrementa, el agua de imbibición implica un aumento de 0.212 % de unidades en la extracción del jugo mezclado.

Tabla 6. Resumen modelos de regresión

Modelo de regresión	Coef. R ²	Error estándar
1. $RtoB96 = -11.784 + 0.173 \cdot PzaJP - 0.0065 \cdot Form\ Miel + 0.068 \cdot Ext\ JM$	90.22 %	0.125 %
2. $Recob = -29.310 + 0.065 \cdot ANP - 0.085 \cdot \% Quem - 0.044 \cdot \% Atras + 1.116 \cdot Pza\ JP + 0.221 \cdot Ext\ JM - 0.056 \cdot FormMiel$	81.61 %	1.366 %
3. $Ext\ JM = 122.835 - 1.043 \cdot Fibra\ Caña + 0.212 \cdot \% Agua\ Imb - 3.838 \cdot Perd\ Bzo$	84.96 %	1.822 %

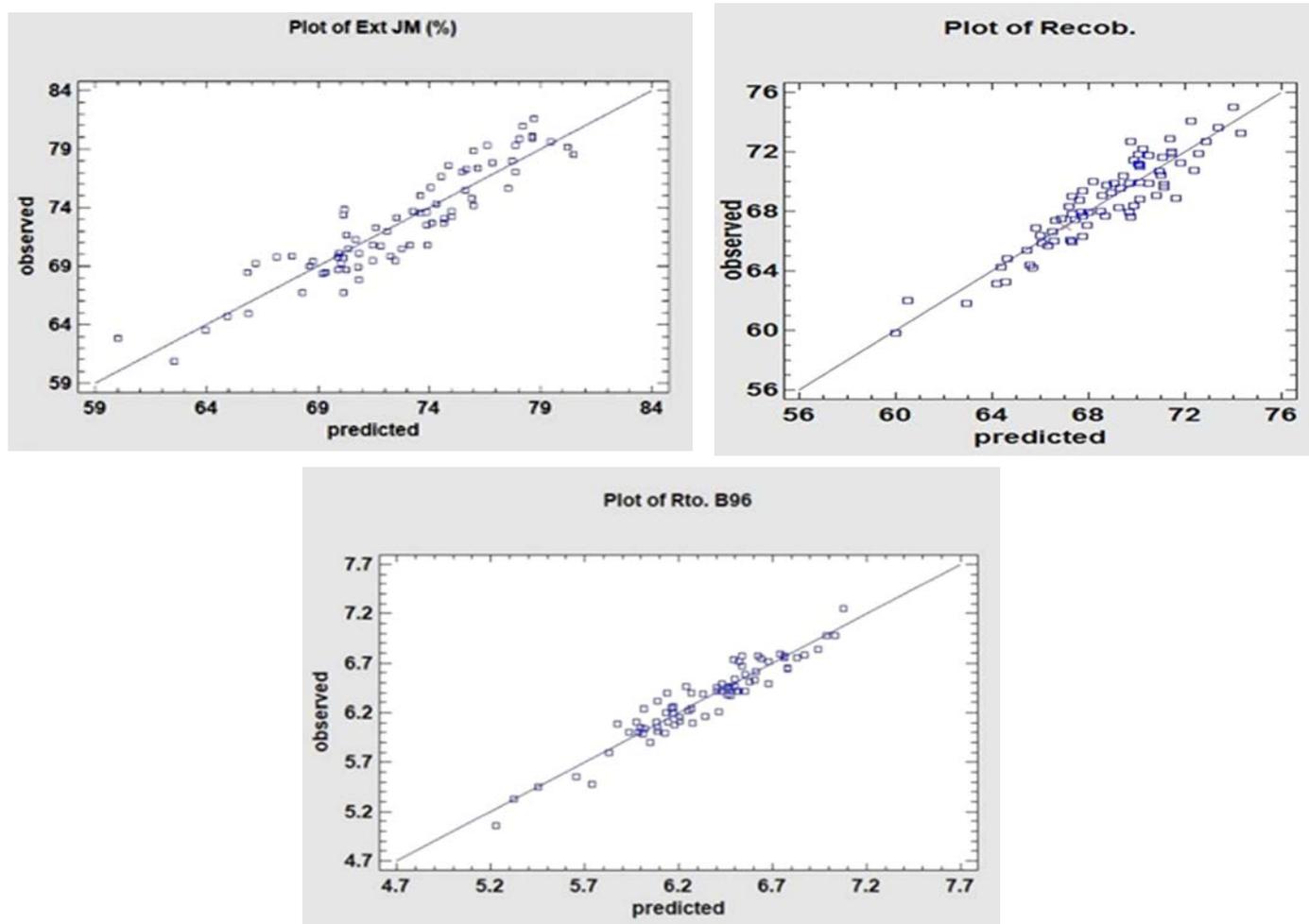


Figura 1. Gráfico de valores predichos contra observados para cada variable de respuesta.

Evaluación del impacto económico

Si se considera un precio unitario de venta de azúcar crudo a granel de 29 713.00 CUP/t y se emplean los modelos de la tabla 6, es posible determinar las t de azúcar dejadas de producir y las pérdidas económicas correspondientes, debido al deterioro de los factores incluidos en los modelos.

Por ejemplo, un incremento de 82 a 85 % de la pureza del jugo primario implicaría que el rendimiento industrial aumentaría en 0.52 unidades de porcentaje y, por lo tanto, se hubieran podido producir 14 456 t de azúcar base 96 adicionales por este concepto, con la misma cantidad de caña molida, lo que representaría un ingreso de 429 531 128.00 CUP por la venta de esa azúcar.

Por otra parte, incrementar de 72 a 90 % la extracción del jugo mezclado impactaría en un crecimiento de 1.22 unidades de rendimiento industrial, lo que significaría producir 36 869 t adicionales de azúcar base 96 y se lograría un ingreso, por este concepto, de 1 095 488 597.00 CUP. Tener en cuenta que la variable que más está afectando la extracción del jugo mezclado es el alto contenido de fibra en caña.

Disminuir de 143 a 110 % la formación de miel significaría un incremento de 0.214 unidades de rendimiento industrial, lo que implicaría producir 6 467 t adicionales de azúcar base 96, que representaría un ingreso de 192 153 971 00 CUP.

El incremento de la pureza del jugo primario de 82 a 85 % también impactaría con un aumento de 3.35 unidades del recobrado, esto significaría 3.35 t adicionales de Pol en azúcar, por cada 100 t de Pol en caña que entrara al ingenio.

Aumentar la extracción del jugo mezclado de 72 a 90 % significaría un incremento de 4 unidades del recobrado, aproximadamente.

Si se lograra incrementar la molienda de 30 a 60 %, entonces el recobrado aumentaría en 2 unidades y mantendría constantes las otras variables.

Estudio comparativo de dos grupos de centrales

En la tabla 7 se reflejan valores promedio de 11 indicadores, identificados como los que más afectan el rendimiento industrial y el recobrado para dos grupos, conformados por 3 centrales cada uno.

Tabla 7. Resumen de los indicadores industriales para dos grupos de centrales

Indicadores	GRUPO 1			GRUPO 2		
	A-24	A-4	A-25	A-8	A-16	A-19
Días mol	93	111	118	79	57	85
% M ext	10.58	11.51	10.44	13.91	10.61	11.02
Pza jp	84.13	83.18	82.77	80.93	83.42	82.52
% Atras	0.00	71.09	33.25	52.88	65.11	43.29
% Quem	9.22	8.50	14.17	35.39	21.49	5.84
Bzo % Caña	38.75	33.82	39.99	35.59	44.32	34.63
Form miel	111.94	126.44	124.18	138.60	122.44	160.02
Pza mb	53.10	56.56	52.32	51.46	58.67	58.39
TRem mat	59.53	33.88	52.31	257.06	56.83	34.18
pH norma	96.81	49.22	83.39	40.7	66.31	71.98
Anp	44.02	34.15	43.61	26.55	21.35	22.30
Ext jm	72.88	100.43	77.50	51.17	69.35	70.26
Rend B96	6.92	9.15	7.32	4.36	6.59	5.58
Reco	77.97	76.02	76.04	65.23	67.51	59.91

- Los centrales del grupo 1 logran recobrados alrededor del 77 %, muy lejos de los valores deseados (≥ 85 %), pero superiores a los recobrados de los centrales del grupo 2, que no alcanzan el 70 %.
- El rendimiento industrial del primer grupo de centrales sobrepasa el 7 %, aunque muy por debajo de 10.5 %, pero superiores al rendimiento industrial logrado por el segundo grupo de centrales que no logran el 7 %.
- Se observa una diferencia significativa de 95 % de confianza, en cuanto al promedio de extracción del jugo mezclado, entre ambos grupos de centrales, mayor para el primer grupo en comparación con el segundo; sin embargo, no se observa una diferencia significativa con respecto a la pureza del jugo primario entre ambos grupos.
- El segundo grupo de centrales se caracteriza por elevadas cantidades de formación de miel, comparado con el primero.
- El central A-8 reporta un elevado tiempo de remoción de materiales en proceso (257.06 h), eso tiene que ver con las paradas prolongadas de este central.

La tabla 8 muestra un resumen de los modelos de aprendizaje automatizado, obtenidos para los 3 centrales incluidos en el grupo 2

Tabla 8. Resumen de los indicadores industriales para dos grupos de centrales

	Modelo de regresión	Coef R ²	Error estándar
A-8	$Rto\ B96 = -15.055 - 0.017 \cdot Bzo\ \% \text{ caña} + 0.092 \cdot Ext\ jm + 0.187 \cdot Pza\ jp$	94.72 %	0.32
A-8	$Reco = 76.56 - 0.046 \cdot Form\ miel + 0.113 \cdot Ext\ jm - 0.205 \cdot Pza\ mb$	56.54 %	4.34
A-16	$Rto\ B96 = -17.17 - 0.189 \cdot M\ ext + 0.261 \cdot Pza\ jp - 0.015 \cdot Form\ miel + 0.093 \cdot Ext\ jm$	96.43 %	0.31
A-16	$Reco = 16.25 + 1.151 \cdot Pza\ jp - 0.118 \cdot Form\ miel + 0.261 \cdot Ext\ jm - 0.807 \cdot Pza\ mb$	92.33 %	2.08
A-19	$Rto\ B96 = -21.042 - 0.063 \cdot Mext + 0.278 \cdot Pza\ jp - 0.008 \cdot Form\ miel + 0.088 \cdot Ext\ jm - 0.008 \cdot TRem\ mat$	91.53 %	0.41
A-19	$Reco = 81.99 - 0.071 \cdot Form\ miel + 0.051 \cdot pH\ norma - 0.160 \cdot TRem\ mat - 0.322 \cdot Ind$	91.58 %	2.15

Si el central A-8 incrementara la pureza del jugo primario de 80.73 % (valor reportado) a 90 %, entonces, potencialmente, aumentaría en 1.73 unidades el rendimiento industrial (tabla 8) y, por lo tanto, podría producir 2062 t de azúcar adicionales, que representarían un ingreso de 61 268 206 00 CUP. Si, además, incrementara la extracción del jugo mezclado de 73.45 % (valor reportado) a 90 % produciría 1479.4 t de azúcar adicionales con la misma caña molida y se obtendrían ingresos de 43 957 412 20 CUP.

Si el central A-16 aumentara la pureza del jugo primario de 83.21 % (valor reportado) a 90 %, esto implicaría producir 1147.6 t de azúcar adicionales y lograr ingresos por 34 098 638 80 CUP. Por otra parte, si redujera las materias extrañas de 14.33 % (valor reportado) a 7 %, entonces, podría producir 907 t de azúcar adicionales y obtendría 26 949 691 00 CUP.

En el caso del central A-19, si aumentara la pureza del jugo primario de 82.70 % (valor reportado) a 90 %, implicaría un incremento de 2 unidades de rendimiento industrial, produciría 2026.6 t de azúcar adicionales y se lograrían ingresos por 60 216 365 00 CUP.

Si este central A-19 lograra incrementar la extracción del jugo mezclado de 73.45 % (valor reportado) a 90 %, eso significaría 1.46 unidades adicionales de rendimiento industrial, 1479.4 t de azúcar y se obtendrían ingresos de 43 957 412 20 CUP.

Por último, si el central A-19 disminuyera la formación de miel de 176 % (valor reportado) a 110 % se incrementaría el rendimiento industrial en 0.53 unidades y, por lo tanto, se obtendrían 537 t de azúcar base 96. Esto equivaldría a 15 955 881 00 CUP en ingresos, por concepto de venta de azúcar.

CONCLUSIONES

1. La herramienta de análisis de proceso presentada es útil a cualquier empresa azucarera para actuar, sobre la base de decisiones informadas, en aquellos factores que más estén incidiendo en los resultados de eficiencia y calidad del azúcar y para mejorar de esos indicadores.

2. Esta herramienta de análisis de proceso aplicada para evaluar el comportamiento de una empresa agroindustrial azucarera permite identificar las potencialidades de mejora en los indicadores de la empresa y la evaluación del impacto económico.
3. Las variables que más afectaron el rendimiento industrial azucarero, el recobrado y la extracción del jugo mezclado son: pureza del jugo primario, fibra en caña, porcentaje de agua de imbibición, porcentaje de caña quemada, aprovechamiento de la norma potencial, caña atrasada y formación de miel.
4. Incrementar el promedio de extracción del jugo mezclado de 72 % a 90 % significaría producir 36 869 t adicionales de azúcar base 96, lo que representaría un ingreso de 1075 579 337 00 CUP.
5. Un aumento de la pureza del jugo primario de 82 a 85 %, en igual período, significaría producir 14 456 t de azúcar base 96 adicionales, que representarían 429 531 128 00 CUP por la venta de esa azúcar.
6. Si el central A-8 lograra incrementar la pureza del jugo primario de 80.73 (valor reportado) a 90 %, entonces, se producirían 2062 t de azúcar adicionales, que representaría un ingreso de 61 26 206 00 CUP. Si, además, incrementara la extracción del jugo mezclado de 73.45 (valor reportado) a 90 % produciría 1479. 4 t de azúcar adicionales con la misma caña molida, para un ingreso de 43 957 412 20 CUP.
7. Si el central A-16 aumentara la pureza del jugo primario de 83.21 (valor reportado) a 90 % se producirían 1147 6 t de azúcar adicionales y se lograrían ingresos por 34 098 638 80 CUP. Por otra parte, si se redujeran las materias extrañas de 14.33 (valor reportado) a 7 %, entonces, se producirían 907 t de azúcar adicionales y se obtendrían 26 949 691 00 CUP.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Gómez, B. *Procedimiento para la mejora de la calidad del proceso industrial cubano de la caña de azúcar*. [Tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Técnicas]. Facultad de Ciencias Empresariales, en la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Las Villas, 2007.
2. Cabrera, A.; Gómez, B.; Rodríguez, R. Métodos estadísticos y económicos para mejora de la gestión industrial azucarera cubana, *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*, 2015, Disponible en: <http://www.eumed.net/rev/caribe/2015/05/industria-azucarera.html>.
3. Ortiz, F. *et al.* Disminución de las pérdidas de sacarosa en la elaboración de meladura en un ingenio azucarero., *Revista de Ingeniería Industrial*, 2008, Vol. 2, No. 1, pp. 1-23.
4. Rein, P. *Ingeniería de la caña de azúcar.*, Capítulos 15 y 16, Verlag Dr. Albert Bartens KG, Berlin, Alemania, 2012, pp. 409-484.
5. Hernández-Palma, H. G., *et al.* Technological Tools Based on Artificial Intelligence in the Sugar Industry: A Bibliometric Analysis and Future Perspectives for Energy Efficiency. In LADEE, 2023, vol. 4 no. 2, pp. 49–64. Barranquilla. e-ISSN 2744-9750 (En línea)
6. Islas, F. J. *et al.* Use of artificial intelligence techniques for optimizing the sugar production process. In *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, Vol. 1054, pp. 91-100. Springer, Cham.
7. Statpoint inc. *Statgraphics Centurion XV*. [DVD], Version 17.2.05, Virginia, EEUU, 2015.
8. Polar Engineering Consulting. SPSS Statistics 17.0. EE.UU., 2008.