

## ***ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE MÁS INCIDEN SOBRE EL RENDIMIENTO INDUSTRIAL AZUCARERO***

### ***ANALYSIS OF THE FACTORS THAT MOST INFLUENCE ON SUGAR CANE INDUSTRIAL YIELD***

*Mauricio Ribas García<sup>1\*</sup>, Ramón Consuegra del Rey<sup>1</sup> y Marlen Alfonso Alfonso<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA). PO. Box 4026,  
La Habana 10400, Cuba.

Recibido: Noviembre 5, 2015; Revisado: Noviembre 25, 2015; Aceptado: Diciembre 4, 2015

#### **RESUMEN**

El sector azucarero cubano requiere implementar métodos que permitan cuantificar con mayor precisión la influencia de las variables tecnológicas del proceso sobre el rendimiento industrial. Se necesita prever el comportamiento de su proceso productivo con el fin de planificar y optimizar el uso de los recursos técnicos, humanos y financieros para mejorar aquellas variables tecnológicas que tienen mayor peso sobre el rendimiento industrial. En este contexto el presente trabajo busca, en primer lugar, identificar aquellas variables tecnológicas que más correlacionadas están con el rendimiento industrial y las principales pérdidas del proceso, a través del análisis de componentes principales; y en segundo lugar, cuantificar el efecto de estas variables sobre el rendimiento industrial azucarero, las pérdidas en miel final y las pérdidas en bagazo, mediante el empleo de modelos de regresión múltiple del tipo log-log. Se muestra el análisis de los resultados obtenidos por estas herramientas estadísticas y su empleo para simular diferentes condiciones de operación del proceso. Los modelos desarrollados son útiles para actuar desde el punto de vista tecnológico sobre el proceso y mejorar el control del mismo.

**Palabras clave:** rendimiento industrial, análisis de regresión, componentes principales, miel final, bagazo.

## **ABSTRACT**

The Cuban sugar industry needs to implement methods to quantify the influence of technological process variables on the sugar cane industrial output as accurately as possible. It is needed to predict the behavior of its productive process in order to plan and optimize the use of the technical, financial and human resources to improve those technological variables that most influence on sugar cane industrial output. In this context the present paper seeks, firstly, to identify those technological variables that are correlated with the industrial performance and the main losses in the process, through the principal component analysis; and secondly, to quantify the effect of these variables on the sugar cane industrial output, losses in final molasses and bagasse losses, by using multiple regression models of log-log. The analysis of the results obtained by these statistical tools and their use to simulate different operating conditions of the process is shown. The developed models are useful to act from a technological point of view of the process and improve control over it.

**Key words:** industrial yield, regression analysis, main components, molasses, bagasse.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Estudiar desde el punto de vista tecnológico y estadístico el problema de la influencia de las diferentes variables de operación del proceso de producción de azúcar y el efecto de las principales pérdidas del proceso sobre el rendimiento industrial tiene una gran importancia ya que permite en base a hechos emitir criterios y tomar acciones para disminuir las pérdidas en proceso, incrementar la producción de azúcar y obtener con ello un producto a un menor costo (Ortiz y col., 2008; Cabrera y col., 2015; Luna y col., 1995; Gómez, 2007; Rodríguez y col., 2011 ).

En la industria azucarera cubana existe una base de datos amplia que necesita ser utilizada en forma eficaz para guiar el desarrollo productivo hacia escenarios más rentables. La utilización correcta de esta información ayudaría a la toma de decisiones con bases objetivas.

La metodología utilizada en este trabajo consiste en una combinación de criterios tecnológicos, análisis estadístico multivariado y ajuste de modelos (ecuaciones de regresión) que mejor describen el comportamiento del rendimiento industrial y las principales pérdidas en el proceso en función de aquellas variables tecnológicas de mayor incidencia sobre estos dos parámetros.

A los efectos del presente artículo se analizaron variables como la pol en caña ( $Pol_C$ ), el aprovechamiento de la norma potencial ( $ANP$ ), aprovechamiento del rendimiento potencial de la caña ( $APROV_{RPC}$ ), tiempo perdido industrial ( $TP_{Ind}$ ), imbibición por ciento en caña ( $Imb\%Caña$ ), por ciento de las mediciones del pH del jugo claro entre 6,7 y 6,9 ( $pH_{Norma}$ ), pérdidas en bagazo ( $Perd_{Bzo}$ ), pérdidas en miel final ( $Perd_{MF}$ ), pérdidas en cachaza ( $Perd_{Cach}$ ) y pérdidas indeterminadas ( $Perd_{Ind}$ ), (Rein, 2012).

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se construyó una matriz de datos con 39 variables cuantitativas continuas y 147 filas con la información final de las zafras, desde 2013 hasta el 2015, para cada uno de los ingenios que molieron en las mismas. Se utilizó el módulo de análisis factorial de la herramienta de software *SPSS Statistics versión 17.0* (Polar Engineering Consulting, 2008) para realizar el análisis multivariado de componentes principales. Los modelos de regresión múltiples fueron obtenidos empleando el software *Statgraphics Centurion XV* (Statpoint Inc., 2007)

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó un análisis multivariado de componentes principales con el objetivo de identificar aquellas variables más relacionadas con el rendimiento industrial y resumir la información contenida en la matriz de datos en un nuevo grupo de variables no correlacionadas llamadas componentes principales. Se obtuvo que las primeras 6 componentes principales explican alrededor del 70 % de la variabilidad contenida en la matriz de datos.

La tabla 1 muestra los pesos que tienen las variables originales en las componentes principales. La primera componente explica alrededor del 28 % de la varianza de los datos y en ella se agrupan las variables que más correlacionadas están con el rendimiento industrial.

- Pol en caña ( $Pol_C$ ) con un coeficiente de peso negativo por lo que mientras mayor sea la cantidad de no azúcares presente en la caña menor va a ser el rendimiento industrial.
- Principales pérdidas en el proceso ( $Perd_{BZO}$ ,  $Perd_{MF}$ ,  $Perd_{Ind}$ ) con coeficiente positivo lo que indica que a mayores pérdidas menor rendimiento industrial.
- Grupo de variables de operación del proceso como son: Aprovechamiento de la norma potencial ( $ANP$ ), aprovechamiento del RPC ( $Aprov_{RPC}$ ), tiempo perdido industrial ( $TP_{Ind}$ ), imbibición por ciento en caña ( $Imb\%Caña$ ) y por ciento de valores del pH del jugo claro entre 6,7 y 6,9 ( $pH_{Norma}$ ).

La segunda componente explica alrededor del 13 % de la varianza de los datos y expresa la influencia que tiene el tiempo perdido agrícola sobre las purezas del jugo mezclado y clarificado. Mientras menor sea el tiempo perdido agrícola la caña llega al ingenio más fresca evitándose la pérdida del contenido de sacarosa en la caña y por lo tanto el jugo mezclado obtenido en la etapa de molienda (jugo mezclado) y el jugo que sale del proceso de clarificación (jugo clarificado) van a tener mayor pureza.

La tercera componente explica alrededor del 10 % de la varianza de los datos y expresa el efecto que tiene las materias extrañas entrando al proceso sobre el aumento de las no sacarosas en caña y esto se traduce en una disminución del brix del jugo mezclado ( $Brix_{JM}$ ) obtenido durante la etapa de molienda y el brix del jugo clarificado ( $Brix_{JC}$ ) que sale de la etapa de clarificación.

Tabla 1. Pesos de las variables originales en las componentes principales

VARIABLES	COMP 1	COMP 2	COMP 3	VARIABLES	COMP 1	COMP 2	COMP 3
<b>Rend</b>	<b>-0,890</b>	0,228	0,199	<b>Pza<sub>JC</sub></b>	-0,391	<b>0,778</b>	-0,062
<b>Pol<sub>C</sub></b>	<b>-0,631</b>	0,511	0,310	<b>pHNorma</b>	<b>-0,509</b>	-0,308	-0,073
<b>TP<sub>Ind</sub></b>	<b>0,692</b>	0,340	0,048	<b>Bzo%Caña</b>	<b>0,473</b>	0,144	-0,113
<b>Aprov<sub>RPC</sub></b>	<b>-0,864</b>	-0,250	0,076	<b>Imb%Caña</b>	<b>-0,525</b>	0,290	-0,338
<b>ANP</b>	<b>-0,721</b>	0,202	-0,117	<b>Perd<sub>Bzo</sub></b>	<b>0,831</b>	0,063	-0,089
<b>Mat<sub>Ext</sub></b>	0,156	-0,019	-0,444	<b>Cach%Caña</b>	-0,199	0,006	-0,077
<b>C<sub>Quem</sub></b>	0,089	-0,147	0,033	<b>Perd<sub>Cach</sub></b>	0,402	0,148	-0,313
<b>Fibra<sub>C</sub></b>	0,359	0,174	-0,116	<b>Perd<sub>MF</sub></b>	<b>0,777</b>	0,064	0,243
<b>C<sub>Atra</sub></b>	0,439	-0,232	0,177	<b>Perd<sub>Ind</sub></b>	<b>0,713</b>	0,357	-0,014
<b>Brix<sub>JM</sub></b>	-0,024	0,014	<b>0,907</b>	<b>Form<sub>Miel</sub></b>	0,417	0,367	0,224
<b>Brix<sub>JC</sub></b>	0,089	0,086	<b>0,818</b>	<b>Pza<sub>MF</sub></b>	0,450	0,335	-0,035
<b>Pza<sub>JM</sub></b>	-0,299	<b>0,840</b>	-0,084	<b>TP<sub>Agri</sub></b>	0,217	<b>-0,463</b>	0,076

En el gráfico de componentes (figura 1) se observa en el eje de la componente uno lo cercano que está el vector de peso de la variable rendimiento industrial con el de las variables aprovechamiento de la norma potencial, imbibición por ciento en caña y pol en caña. En sentido contrario de este mismo eje aparecen como variables más relacionadas con el rendimiento industrial las principales pérdidas del proceso y el tiempo perdido industrial.

En el eje de la segunda componente principal se aprecia que a mayor tiempo perdido agrícola menores van a ser las purezas de los jugos mezclados y clarificados.

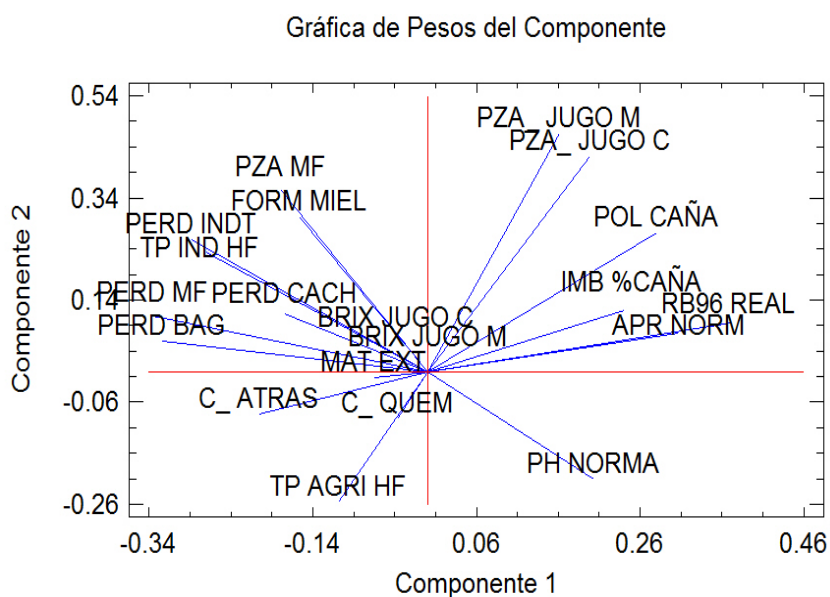


Figura 1. Gráfico de pesos de los componentes

### 3.1. Modelos de regresión

Tomando en cuenta las variables más relacionadas con el rendimiento industrial seleccionadas por el análisis de componentes principales se decidió ejecutar un análisis de regresión múltiple para evaluar el impacto de estas variables sobre el rendimiento industrial y obtener modelos con una buena capacidad de predicción de la respuesta observada.

Después de analizar diferentes variantes de modelos regresionales y comprobar los supuestos normalidad e independencia de los residuos que garantizan obtener los mejores estimadores linealmente independientes de los coeficientes del modelo, identificar posibles puntos anómalos y evaluar la bondad de ajuste de los modelos mediante el coeficiente de determinación  $R^2$ , se identificaron un conjunto de modelos regresionales del tipo causa-efecto que permiten describir el comportamiento del rendimiento industrial y las principales pérdidas en el proceso azucarero.

La prueba F de Fisher de análisis de varianza (ANOVA) para estos modelos permitió concluir con un 95 % de confianza que las relaciones propuestas son adecuadas para describir el comportamiento de las variables de respuestas. Las pruebas t de Student para evaluar la significación de los parámetros del modelo dio significativa en todos los casos con un 95 % de confianza.

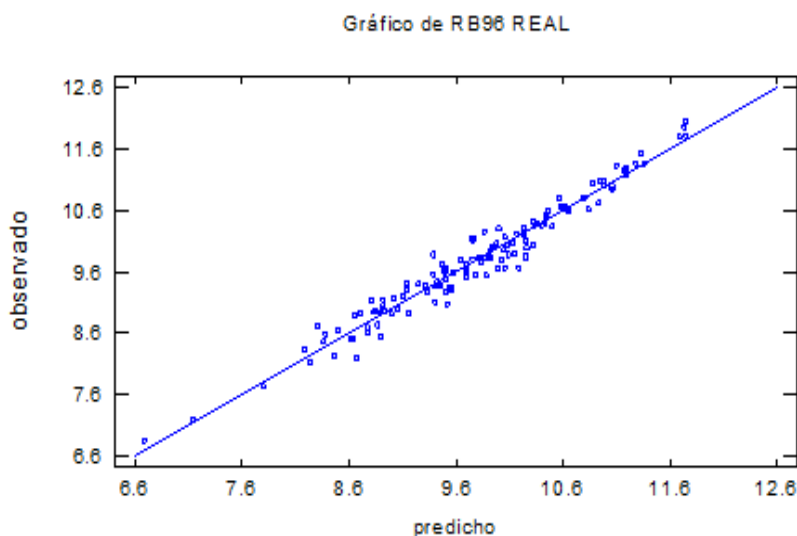
#### 3.1.1. Modelos para predecir el rendimiento industrial

$$Rend = 2,99 + 0,79 \cdot Pol_C - 0,17 \cdot Perd_{Bzo} - 0,11 \cdot Perd_{Cza} - 0,11 \cdot Perd_{MF} - 0,09 \cdot Perd_{Ind} \quad (1)$$

$R^2 = 96,1$       Error estándar = 0,190

$$Rend = 1,94 + 0,78 \cdot Pol_C + 0,008 \cdot ANP + 0,004 \cdot pHNorma - 0,15 \cdot Perd_{Bzo} - 0,11 \cdot Perd_{MF} \quad (2)$$

$R^2 = 93,22$       Error estándar = 0,240



**Figura 2.** Gráfico de valores predichos por el modelo contra valores observados de rendimiento industrial

La figura 2 muestra como los valores observados de rendimiento industrial se distribuyen alrededor del modelo de regresión a una distancia muy cercana a este, no observándose la presencia de puntos anómalos. En promedio los valores observados de rendimiento industrial se diferencian, como máximo, de los predichos por el modelo en 0,24 unidades porcentuales.

La ecuación 1 logra explicar el 96 % de la variabilidad presente en el rendimiento con un error estándar de las estimaciones de 0,19 lo que indica que los valores predichos por el modelo de rendimiento industrial en promedio se diferencian, como máximo, con los valores observados en 0,19 unidades porcentuales. El coeficiente de la  $Pol$  en caña muestra que por cada unidad porcentual que se incrementa esta variable el rendimiento aumentaría en 0,79 unidades porcentuales manteniendo constante las otras variables predictoras.

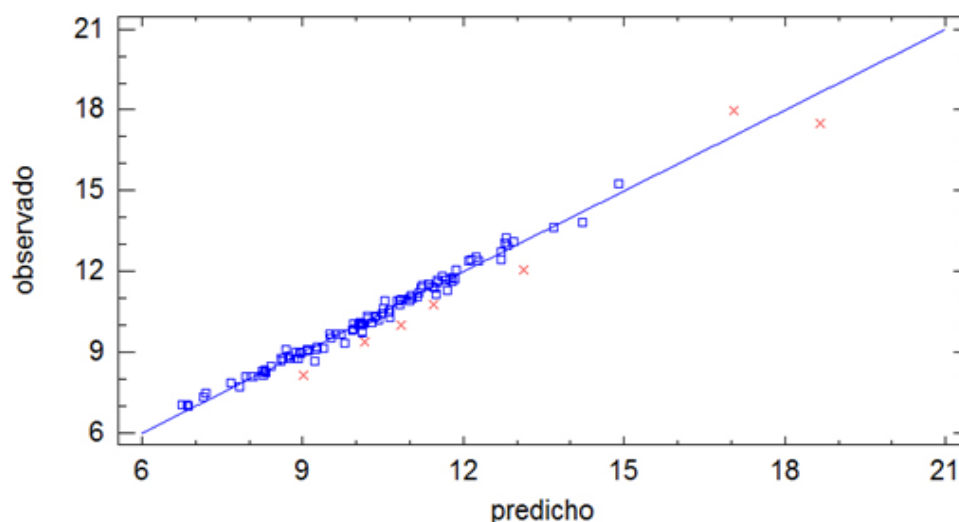
Por cada unidad porcentual de incremento de la pérdida en bagazo el rendimiento disminuye en 0,17 unidades porcentuales bajo condiciones constantes de las otras variables. Al aumentar en una unidad porcentual las pérdidas en miel final el rendimiento disminuye en 0,11 unidades porcentuales para iguales condiciones de las otras variables que intervienen en el modelo.

Al incluir en el modelo (Ecuación 2) otras variables relacionadas con el rendimiento industrial como el  $ANP$  y  $pHNorma$  se obtienen coeficientes muy similares de  $Pol_C$ ,  $Perd_{Bzo}$  y  $Perd_{MF}$  a los de la ecuación 1. Por cada unidad porcentual de incremento del  $ANP$  el rendimiento industrial aumenta en 0,008 unidades porcentuales con condiciones constantes de las otras variables del modelo.

### 3.1.2. Modelo para predecir las pérdidas en miel final

$$Perd_{MF} = 45,48 - 0,71 \cdot Pza_{JM} + 0,08 \cdot Form_{Miel} + 0,38 \cdot Pza_{MF} \quad (3)$$

$$R^2 = 98,7 \quad \text{Error estándar} = 0,193$$



**Figura 3.** Gráfico de valores predichos por el modelo contra valores observados de pérdidas de miel final.

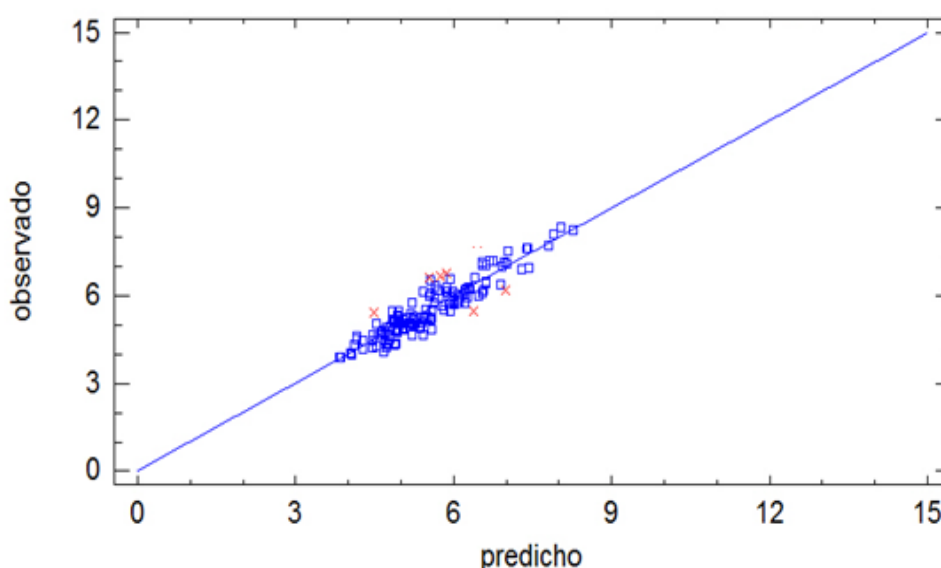
En el gráfico de la figura 2 se muestra el buen ajuste de los valores observados de pérdidas de miel final al modelo de regresión. En promedio estos valores se diferencian, como máximo, en 0,193 unidades porcentuales de los valores predichos.

La Ec. 3 explica el 98,7 % de la variabilidad de las pérdidas en miel final. Por cada unidad porcentual de incremento de la pureza del jugo mezclado ( $Pza_{JM}$ ), las  $Perd_{MF}$  disminuyen en 0,71 unidades porcentuales manteniendo constante las otras variables. Si la pureza de la miel final ( $Pza_{MF}$ ) aumenta en una unidad porcentual entonces las  $Perd_{MF}$  aumentarían en 0,38 unidades porcentuales manteniendo las otras variables en valores constantes.

### 3.1.3. Modelo para predecir las pérdidas en bagazo

$$Perd_{Bzo} = -7,17 + 3,43 \cdot Pol_{Bzo} + 0,46 \cdot Fibra_C - 0,05 \cdot Imb\%Caña \quad (4)$$

$$R^2 = 91,7 \quad \text{Error estándar} = 0,419$$



**Figura 3.** Gráfico de valores predichos por el modelo contra valores observados de pérdidas de bagazo

Los valores observados de pérdidas en bagazo y los predichos por el modelo se diferencian en promedio, como máximo, en 0,42 unidades porcentuales (figura 3). Además, el modelo es capaz de explicar alrededor del 92 % de la variabilidad total incluida en esta variable lo que significa una buena bondad de ajuste del mismo.

En la Ec. 4 aparece como variable predictora significativa además de la pol en bagazo ( $Pol_{Bzo}$ ) y la fibra en caña ( $Fibra_C$ ), la imbibición por ciento en caña ( $Imb\%Caña$ ) reflejando el efecto que tiene el agua de imbibición para aumentar la extracción en los molinos y por lo tanto disminuir las pérdidas en bagazo.

### 3.2. Modelos Log-Log

La ecuación 5 representa la correspondiente función log-log del modelo (Ecuación 2). En este caso los coeficientes representan la elasticidad de cada factor con respecto al rendimiento industrial. Por cada 1 % de incremento de la  $Pol_C$ , el rendimiento

aumentaría en 0,89 % manteniendo constante las otras variables. De forma similar se interpretan los otros parámetros.

$$\log(Rend) = 0,192 + 0,89 \cdot \log(Pol_C) + 0,05 \cdot \log(ANP) + 0,03 \cdot \log(pHNorma) - 0,11 \cdot \log(Perd_{Bzo}) - 0,11 \cdot \log(Perd_{MF}) \quad (5)$$

$R^2 = 93,10$       Error estándar = 0,02

El modelo log-log (Ecuación 6) para las pérdidas de miel final indica que un incremento del 1 % de la  $Pza_{JM}$  implica que las pérdidas en miel final disminuyen en 6,03 % manteniendo constante las otras variables. Si la  $Pza_{MF}$  se incrementa en un 1 % entonces las pérdidas en miel final aumentan en 1,53 % sin variar las condiciones de las otras variables.

$$\log(Perd_{MF}) = 18,88 - 6,03 \cdot \log(Pza_{JM}) + 0,94 \cdot \log(Form_{Miel}) + 1,53 \cdot \log(Pza_{MF}) \quad (6)$$

$R^2 = 99,32$       Error estándar = 0,014

Hay que señalar que identificar estos factores como de alta influencia sobre el rendimiento industrial y las principales pérdidas en el proceso no representa el descubrimiento de una verdad nueva, la experiencia acumulada por los especialistas del sector, su conocimiento empírico de la realidad productiva de las empresas azucareras, les ha permitido identificar de alguna manera a estos factores por otra vía. Lo que realmente aporta los modelos anteriores es una medición de la sensibilidad de estos factores a partir de métodos científicos.

### 3.3. Alternativas de simulación

A continuación utilizando los modelos de las ecuaciones 2, 3 y 4 se simularon tres alternativas de comportamiento de las variables predictoras. La primera alternativa corresponde a un comportamiento promedio de todas las variables predictoras, la segunda alternativa se definió como una situación más favorable de estas variables con respecto al comportamiento promedio y la tercera alternativa refleja una situación más desfavorable de las variables predictoras con respecto al promedio.

Los resultados de la tabla 2 predicen una diferencia de 2 unidades porcentuales del rendimiento industrial entre las situaciones extremos, mientras que las pérdidas en miel final se diferencian en 6 unidades porcentuales y las pérdidas en bagazo en 2,4 unidades porcentuales.

El modelo para el rendimiento industrial predice que para una pol en caña de 12,5 %, pérdidas en mieles finales de 8,2 %, pérdida en bagazo de 4,4 % y aprovechamiento de la norma potencial de 73,4 % se alcanza un rendimiento industrial de 11,15 %. Este valor está muy cerca de la proyección de desarrollo de la industria azucarera cubana.

El modelo para las pérdidas de miel final predice que cuando la pureza del jugo mezclado está alrededor del 86 %, la formación de miel alrededor del 101 % y la pureza de miel final de 39 % entonces las pérdidas de miel final disminuyen a un 7,3 %.



**Tabla 2.** Comparación entre dos comportamientos extremos de las variables independientes

	<i>Pol<sub>C</sub></i>	<i>ANP</i>	<i>pHNorma</i>	<i>Perd<sub>Bzo</sub></i>	<i>Perd<sub>MF</sub></i>	<i>Rend</i>
<b>Situación Promedio</b>	11,80	63,02	89,22	5,38	9,83	<b>10,12</b>
<b>Situación más favorable</b>	12,54	73,4	100	4,39	8,19	<b>11,15</b>
<b>Situación menos favorable</b>	11,06	52,64	77	6,37	11,47	<b>9,08</b>

	<i>Pza<sub>JM</sub></i>	<i>Form<sub>Miel</sub></i>	<i>Pza<sub>MF</sub></i>	<i>Perd<sub>MF</sub></i>
<b>Situación Promedio</b>	84,45	117,28	40,72	<b>10,38</b>
<b>Situación más favorable</b>	86,22	101,28	39,25	<b>7,28</b>
<b>Situación menos favorable</b>	82,68	133,28	42,19	<b>13,47</b>

	<i>Pol<sub>Bzo</sub></i>	<i>Fibra<sub>C</sub></i>	<i>Imb%Caña</i>	<i>Perd<sub>Bzo</sub></i>
<b>Situación Promedio</b>	1,98	15,03	21,66	<b>5,45</b>
<b>Situación más favorable</b>	1,74	14,58	25,15	<b>4,25</b>
<b>Situación menos favorable</b>	2,22	15,48	18,17	<b>6,66</b>

Por último, se utilizaron las variables predictoras incorporadas en el modelo ecuación (5) para caracterizar a los ingenios más eficientes durante la zafra 2015, los resultados se muestran en la tabla 3. Se observa que estos ingenios en promedio presentan un ANP superior al 76 %, Pol en caña superior a 12 %, pérdidas en miel final alrededor de 8 %, pérdidas en bagazo de 4,2 % y rendimiento observado industrial de 11,26 %. Bajo estas condiciones el modelo (2) predice un rendimiento promedio de los ingenios más eficientes en la zafra 2015 de 11,12 %, en contraste con el rendimiento promedio real de 11,26 %, lo que indica que la predicción del modelo es precisa en un 98,8 %.

De lo anterior se puede concluir que si todos los ingenios del país trabajaran de forma estable en las condiciones de operación que indican las variables predictoras se garantizaría valores de rendimiento industrial por encima del 11 % lo que significaría incrementar la producción de azúcar en aproximadamente un 11 % con respecto a la obtenida en la zafra 2015.

**Tabla 3.** Valores de rendimientos predichos por el modelo para los ingenios más eficientes

<i>Ingenios más Eficientes Zafra 2015</i>	<i>ANP (%)</i>	<i>Pol<sub>C</sub> (%)</i>	<i>Perd<sub>Bz</sub> (%)</i>	<i>Perd<sub>M</sub> (%)</i>	<i>pHNorm (%)</i>	<i>Rend (%)</i>	<i>Rend Pred. (%)</i>	<i>Desv. Est. Relativa (%)</i>
<b>14 de Julio</b>	97,16	12,47	3,91	7,02	99,83	11,37	11,48	0,949
<b>1<sup>ro</sup>. de Enero</b>	76,00	13,19	4,33	7,31	94,18	11,95	11,71	1,995
<b>Antonio S.</b>	71,37	12,14	3,91	7,48	97,22	11,00	10,95	0,463
<b>Uruguay</b>	72,40	12,55	4,04	8,30	89,42	11,25	11,09	1,428
<b>Siboney</b>	67,01	12,83	4,23	9,35	98,37	11,36	11,09	2,336
<b>Enidio Díaz</b>	74,41	12,01	4,38	8,10	97,74	10,61	10,64	0,288
<b>Promedio</b>	<b>76,39</b>	<b>12,53</b>	<b>4,18</b>	<b>8,07</b>	<b>97,47</b>	<b>11,26</b>	<b>11,12</b>	<b>1,200</b>

#### **4. CONCLUSIONES**

1. Se demuestra la utilidad de la aplicación del análisis de componentes principales para identificar relaciones de causa-efecto entre las diferentes variables que miden el comportamiento del proceso de producción en un ingenio azucarero.
2. El modelo de regresión (2) permite predecir con un buen nivel de precisión el rendimiento industrial azucarero y cuantificar el efecto que tienen la  $Pol_C$ ,  $ANP$ ,  $pHNorma$  y las principales pérdidas del proceso sobre esta variable tecnológica.
3. El modelo de regresión (4) permitió predecir adecuadamente las pérdidas en bagazo y cuantificar el efecto que tienen la  $Pol_{Bzo}$ ,  $Fibra_C$  y la  $Imb\%Caña$  sobre esta variable del proceso.
4. El modelo de regresión (3) predice las pérdidas en miel final y cuantifica el efecto que tienen la  $Pza_{JM}$ ,  $Form_{Miel}$  y la  $Pza_{MF}$  sobre esta variable del proceso.

#### **5. RECOMENDACIONES**

1. Emplear los modelos presentados para actuar desde el punto de vista tecnológico sobre el proceso y mejorar el control del mismo.

#### **REFERENCIAS**

- Cabrera, A., Gómez, B., y Rodríguez, R., Métodos estadísticos y económicos para mejora de la gestión industrial azucarera cubana, Revista Caribeña de Ciencias Sociales, Vol. 1, No. 1, 2015, pp. 1-5, Disponible en: <http://www.eumed.net/rev/caribe/2015/05/industria-azucarera.html>.
- Gómez, B., Procedimiento para la mejora de la calidad del proceso industrial cubano de la caña de azúcar., Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Facultad de Ciencias Empresariales, en la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba, 2007.
- Luna, C.A., Cock, J.H., Palma, A.E., Díaz, L.V., Moreno, C.A., Análisis de la productividad en la agroindustria azucarera de Colombia y perspectivas para aumentarla [en línea] Colombia: CENICANA, Vol. 1, No. 3, 1995, pp. 373-394. Disponible en: <http://www.cenicana.org>.
- Ortiz, F., Tobón, L. G., Alvarado, A. M., Torres, R., Báez, O., Disminución de las pérdidas de sacarosa en la elaboración de meladura en un ingenio azucarero., Revista de Ingeniería Industrial, Vol. 2, No. 1, 2008, pp. 1-23.
- Rodríguez, B. R. y Pacheco, F.U., Pronóstico del costo de producción de azúcar, en la provincia de Santiago de Cuba, mediante técnicas econométricas., Anuario facultad de ciencias económicas y empresariales, Número especial, 2011, pp.14-26.
- Rein, P., Ingeniería de la caña de azúcar., Capítulos 15 y 16, Verlag Dr. Albert Bartens KG, Berlin, Alemania, 2012, pp. 409-484.
- Statpoint inc. Statgraphics Centurion XV., [DVD], Version 15.2.05, Virginia, EEUU, Tutorial Regresión Múltiple, 2007, pp. 1-32.
- Polar Engineering Consulting., SPSS Statistics 17.0. EEUU, Tutorial Multiple Response Sets, 2008, pp. 1-40.