

**Artículo Original**

**OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA PARA EL DISEÑO DE UNA PLANTA  
DE SURTIDOS COMBINADOS DE MANIHOT ESCULENTA  
CRANTZ POR VÍA SEMI-MECANIZADA**

**ECONOMIC OPTIMIZATION FOR THE DESIGN OF A SEMI-MECHANIZED  
COMBINED ASSORTMENTS PLANT OF MANIHOT ESCULENTA GRANTZ**

Laura Rodríguez Serrano<sup>1</sup> <https://orcid.org/0009-0004-4729-6774>

Amanda Acosta Solares<sup>2\*</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7656-5476>

Omar Pérez Navarro<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6963-1327>

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones en Viandas Tropicales (INIVIT). Finca Tres Carolinas,  
Santo Domingo, Villa Clara, Cuba.

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central  
"Marta Abreu" de las Villas. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Julio 12, 2023; Revisado: Septiembre 18, 2023; Aceptado: Octubre 13, 2023

**RESUMEN**

**Introducción:**

El diseño óptimo de tecnologías para la producción de surtidos combinados, constituye una alternativa rentable para el desarrollo del cultivo de Manihot esculenta Crantz (yuca) y sus productos industrializables.

**Objetivo:**

Desarrollar la optimización económica para el diseño de una planta de surtidos combinados de Manihot esculenta Crantz por vía semi-mecanizada.

**Materiales y Métodos:**

Se concibió un esquema semi-mecanizado híbrido para la producción combinada de almidón, casabe y harina. Se generó un diseño de vértices extremos (DVE) de segundo orden para la distribución de yuca en las tres producciones, y optimizaron los modelos cuadráticos obtenidos para la ganancia (G), el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de recuperación al descuento (PRD). Para la evaluación de los indicadores se desarrolló el diseño del equipamiento fundamental y los balances materiales y energéticos.



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

\* Autor para la correspondencia: Amanda Acosta, Email: [acostaamanda106@gmail.com](mailto:acostaamanda106@gmail.com)



### **Resultados y Discusión:**

La tecnología semi-mecanizada multipropósito emplea las mismas etapas iniciales para los tres procesos y un secado neumático común para los procesos de almidón y harina. Los parámetros óptimos de operación se corresponden con una Ganancia de 236 882 USD/año, un VAN de 1 242 730 USD, una TIR del 33,10 % y un PRD de 3,97 años, y se alcanzan para una distribución de 60 % para la obtención de almidón, 10 % para casabe y 30 % para harina.

### **Conclusiones:**

Con la distribución de materia prima que optimiza los indicadores económicos y de rentabilidad, se garantiza la factibilidad de la producción con compatibilidad energética y ambiental.

**Palabras clave:** almidón; casabe; harina; optimización; tecnología semi-mecanizada.

## **ABSTRACT**

### **Introduction:**

The optimal design of technologies for the production of combined assortments, constitutes a profitable alternative for the development of the cultivation of *Manihot esculenta* Crantz (cassava) and its industrializable products.

### **Objective:**

To develop the economic optimization for the design of a combined assortment plant of *Manihot esculenta* Crantz by semi-mechanized way.

### **Materials and Methods:**

A hybrid semi-mechanized scheme was devised for the combined production of starch, cassava and flour. A second order extreme vertex design (EVD) was generated for the distribution of cassava in the three productions, and the quadratic models obtained for profit (G), net present value (NPV), internal rate of return (IRR) and discounted payback period (DRP) were optimized. For the evaluation of the indicators, the design of the basic equipment and the material and energy balances were developed.

### **Results and Discussion:**

The multipurpose semi-mechanized technology uses the same initial stages for the three processes and a common pneumatic drying for the starch and flour processes. The optimal operating parameters correspond to a profit of 236 882 USD/year, a NPV of 1 242 730 USD, an IRR of 33.10 % and a DRP of 3.97 years, and are achieved for a distribution of 60 % for starch, 10 % for cassava and 30 % for flour.

### **Conclusions:**

With the raw material distribution that optimizes economic and profitability indicators, production feasibility is guaranteed with energetic and environmental compatibility.

**Keywords:** starch; cassava; flour; optimization; semi-mechanized technology.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Las raíces de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) son consideradas un producto estratégico y base para el desarrollo de numerosas industrias. Por tanto, al hacer viable

---

su consolidación, se han desarrollado sistemas de producción rentables y sostenibles por lo cual, es cada vez más urgente la adaptación de tecnologías que, una vez incorporadas, fortalezcan la cadena productiva y sus derivados industriales.

Este tubérculo se cultiva en más de 90 naciones, siendo muy valorado por su contribución a la seguridad alimentaria en muchos países tropicales (Zayas y col., 2019). En Cuba esta actividad se realiza en los tres escenarios productivos: urbano, suburbano y polos productivos, bajo diferentes tecnologías y como tal, en la mayoría de las condiciones edafo-climáticas (Beovides y col., 2013); donde se han desarrollado genotipos de mayor rendimiento, mejor adaptados a las condiciones que imponen el cambio climático y las nuevas exigencias del mercado del siglo XXI, y con características multipropósito para la producción industrial y consumo humano directo (Beovides y col., 2014).

Debido a su composición y sobre todo a su valor energético y otras características, como el poder aglutinante, se pueden obtener una gama de productos industrializables, como el almidón (Pérez, 2018) y sus derivados (Abbas y col., 2018). Además, la harina de esta raíz tuberosa es una fuente energética alternativa para alimento animal en el trópico, por su contenido en carbohidratos solubles y puede competir con el maíz forrajero o resultar un excelente complemento de este. Otro de los principales surtidos de esta planta es el casabe, que a pesar de ser un producto no industrializable en Cuba (Ley y col., 2021), es un alimento rico en carbohidratos, con bajo contenido en proteínas y minerales.

Por ello se han desarrollado estudios para la obtención de almidones nativos y modificados estructuralmente por vía física, química y enzimática (Pérez y col., 2022 a), donde se han diseñado las tecnologías para la obtención de almidón precoloidal (Pérez y col., 2017), (Pérez y col., 2022 b) y almidón gelatinizado acetilado (Pérez y col., 2022 a). En ellos destaca la importancia de la optimización y el análisis técnico económico y ambiental de procesos en la industria para garantizar la eficiencia de la productividad, la reducción de los costos de operación y riesgos medioambientales o de inocuidad, así como el aumento de la calidad del producto.

En este marco emerge la necesidad del diseño de tecnologías multipropósitos para la producción de surtidos combinados como la alternativa más rentable para el desarrollo de este cultivo y sus productos industrializables. Estas incorporaciones constituyen el motor de un desarrollo tecnológico sostenible, para el cual es indispensable trabajar en la identificación de nichos de mercado para productos procesados y en los factores que harían viable el desarrollo de la agroindustria de la yuca: la producción de material vegetal para la reproducción de nuevas variedades, la transferencia de tecnología, los estudios de factibilidad de proyectos agroindustriales, la identificación de mercados internos y externos y la aplicación de tecnologías de procesamiento, entre otros.

En 2018 Pérez realizó una propuesta tecnológica para la producción de los surtidos combinados almidón, casabe y harina por vía mecanizada. La misma arrojó resultados técnico-económicos favorables que mejoran cuando la cantidad de yuca destinada a la producción de almidón se incrementa respecto a los otros surtidos. Ello obedece al mejor precio y valor agregado del almidón respecto a la harina y al casabe. Por otra parte, Pérez y col., (2019) realizaron un estudio de las potencialidades técnico-económicas para la producción de casabe en Cuba, que incluye una propuesta

---

tecnológica para dicho surtido en condiciones mecanizadas, que pretende incentivar un mercado del producto a partir de la producción de niveles moderados o bajos en condiciones adecuadas de calidad e inocuidad. Adicionalmente, se han efectuado propuestas tecnológicas para la producción de harina de yuca en sistemas de secado neumático de pastas trituradas en seco (Pérez y col., 2022 b).

Considerando que las estrategias inversionistas actuales del Ministerio de la Agricultura están dirigidas a la implementación de equipos construidos total o parcialmente en el territorio nacional, es conveniente una propuesta semi-mecanizada, integrando el desarrollo de etapas de obtención de estos productos por métodos tradicionales, en condiciones operacionales económicamente óptimas que solvete las limitaciones tecnológicas de la producción mecanizada y permita aprovechar las potencialidades que manifiesta Ruz y col., (2021) sobre este cultivo.

Teniendo en cuenta estos antecedentes, el objetivo del trabajo es desarrollar la optimización económica para el diseño de una planta de sutidos combinados de Manihot esculenta Crantz por vía semi-mecanizada.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### ***2.1. Concepción tecnológica multipropósito en la producción combinada***

El tratamiento multipropósito se sustentó en el uso de etapas o tratamientos primarios y secundarios (Pérez, 2018). Para la concepción tecnológica del proceso se desarrolló vigilancia tecnológica (Ley, 2006) mediante investigación de procesos y recopilación de información, según el procedimiento estratégico de desarrollo de estos procesos complementado con asimilación tecnológica de Pérez y col., (2021). Se consideró la factibilidad constructiva del equipamiento de manera que la instalación multipropósito pueda ser construida por la industria mecánica nacional. Sobre esta base se concibió un esquema semi-mecanizado, híbrido entre las tecnologías tradicional y mecanizada, teniendo en cuenta que el equipamiento mecanizado para las operaciones de separación (Pérez y col., 2021), purificación (Pérez y col., 2017) y concentración (OCDE-FAO, 2013) no cumplen esta condición.

El tratamiento primario se concibió común a los tres procesos, con la peculiaridad de que la trituración tiene que efectuarse en seco (Pérez y col., 2021).

En el proceso secundario para elaborar casabe (Ley y col., 2021) se desarrolló la secuencia operacional para las etapas de filtrado, desmigado, mezclado/moldeado, horneado y envasado/retractilado. En el procesamiento de almidón se estableció la separación por filtrado de la lechada de almidón y la fibra rica en almidón, esta última con destino final de obtención de harina. Para el posterior tratamiento de la lechada se consideraron las etapas de sedimentación y filtración, y finalmente para ambas corrientes separadas, las etapas de secado, molienda/tamizado y envase.

En función de las demandas inversionistas y operacionales de cada etapa, se desarrolló la selección tecnológica y el diseño del equipamiento fundamental para la optimización económica del proceso. En la obtención de casabe se determinaron los parámetros fundamentales de diseño del horno (Pérez, 2018), en la obtención de harina y almidón los del secadero neumático (Pérez y col., 2022 b) y para este último surtido a su vez los de los canales de sedimentación (Alarcón y Dufour, 1998), dada la sensibilidad de estos ante cambios en los flujos productivos y su marcada influencia en los costos de

---

inversión y de operación del proceso.

## 2.2. Relación de variables independientes y los indicadores económicos y de rentabilidad

Según los resultados planteados por Pérez (2018) con el uso de distribuciones fijas en la disponibilidad de raíces de yuca dedicadas a cada surtido, se comprobó que la optimización de la cantidad de materia prima destinada a las salidas productivas de almidón ( $x_1$ ), casabe ( $x_2$ ) y harina ( $x_3$ ), depende de las proporciones de la mezcla destinadas para cada fin y no de la cantidad inicial de la misma.

Con este propósito, el desarrollo de un diseño de experimentos con mezclas que tienen  $q$  componentes, permitió la evaluación del comportamiento de las respuestas para varias combinaciones de dichos componentes. Particularmente, en el problema de optimización abordado, las proporciones no pueden variar entre 0 y 1 por la existencia de límites, siendo necesario que la proporción de cada componente  $i$  satisfaga dos restricciones  $\sum_{i=1}^q x_i = 1$ ;  $0 \leq L_i \leq x_i \leq L_s \leq 1$ ; donde  $L_i$  y  $L_s$  son el límite inferior y superior respectivamente.

Considerando las razones presentadas por Pérez (2018), se estableció que la cantidad de yuca destinada a la obtención de almidón, casabe y harina debe distribuirse entre un 50-60 %, 5-10 % y 30-45 % respectivamente. Para el estudio de la región experimental, de acuerdo a las especificaciones anteriormente declaradas, se generó un Diseño de Vértices Extremos (DVE) de segundo grado (Silva y col., 2019) en el software *Statgraphics Centurion XV.II*, utilizando los vértices de la región restringida como base del diseño, junto con puntos entre el centroide global y el centroide de la región experimental como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Factores y parámetros del DVE de segundo orden para la optimización técnico-económica en la producción de surtidos combinados

Corrida	Niveles de los factores (Fracción de la disponibilidad de raíces destinada al surtido)		
	Almidón ( $x_1$ )	Casabe ( $x_2$ )	Harina ( $x_3$ )
1	0,6	0,075	0,325
2	0,5	0,1	0,4
3	0,575	0,0875	0,3375
4	0,5	0,05	0,45
5	0,55	0,05	0,4
6	0,55	0,075	0,375
7	0,575	0,0625	0,3625
8	0,6	0,1	0,3
9	0,55	0,1	0,35
10	0,5	0,075	0,425
11	0,525	0,0625	0,4125
12	0,6	0,05	0,35
13	0,525	0,0875	0,3875

La ganancia (G) asociada a este proceso, se determinó en función de los costos totales de producción ( $CTP_{SC}$ ) y las ventas totales de los tres surtidos. Se consideraron como indicadores dinámicos de rentabilidad el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de recuperación al descontado (PRD) (Pérez y col., 2022 b). Estas variables respuestas se determinaron para las combinaciones de los factores independientes del diseño. Para este análisis se estimó 15 años de vida útil del proyecto con un factor de descuento del 10 %, y se consideró un aprovechamiento de la capacidad instalada de 50 % para el primer año, 80 % para el segundo año y 100 % a partir del año 3.

Los costos de inversión (CI) y producción del proceso se estimaron por la metodología de Peters y Timmerhaus, (1991). Se consideró que la materia prima fundamental, raíces de yuca, se adquiere a precios mayoristas desde una red de productores agropecuarios a 0,07 USD/kg. El resto de las materias primas, materiales y servicios auxiliares, incluidos los aditivos para casabe se valorizaron a precios corrientes internacionales actualizados y se determinaron a través de balances de materiales y energía, donde se mostró el consumo de combustible Crudo cubano (CC) demandado por los requerimientos energéticos, dada su notable influencia económica. De igual forma se valorizaron las ventas, empleando para el casabe el precio informado por Pérez (2018) a partir de la determinación del punto de equilibrio para ese proceso y la consideración de un margen de ganancias en presentaciones de galletas de 50 g. Para la determinación de la inversión se estimó el costo actualizado del equipamiento principal como funciones de la capacidad productiva para cada surtido (Sinnott y Towler, 2020).

### **2.3. Modelación estadística y optimización**

El DVE de segundo grado permitió el ajuste de los datos a un modelo canónico cuadrático (Ortega y col., 2015) de la forma:

$$y = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i < j} \sum_{j=2}^q \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

Donde los  $\beta_i$  son los coeficientes de regresión para los términos de primer orden y los  $\beta_{ij}$  son los coeficientes para los términos de producto cruz.

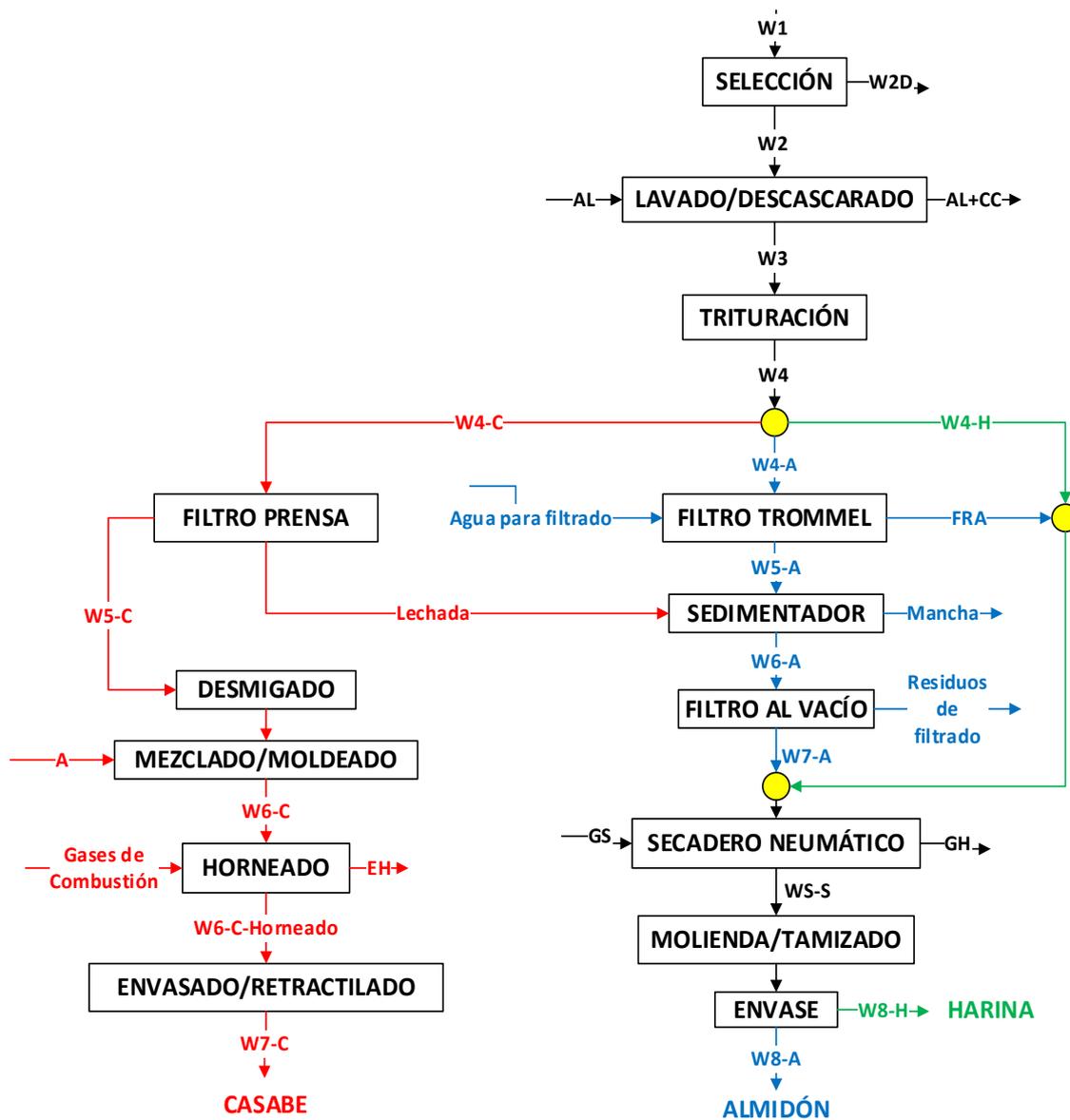
Se verificó la significación de los coeficientes para un 95 % de confianza mediante el análisis de varianza de la prueba de ANOVA y el comportamiento de los residuos del modelo. Mediante la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) (Acosta y col., 2021) se determinaron las coordenadas del mejor punto dentro de la región experimental delimitada por un polígono irregular.

## **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **3.1. Esquema tecnológico de producción combinada y parámetros de diseño del equipamiento fundamental**

En la Figura 1 se muestra el diagrama de bloques del proceso de producción de surtidos combinados en la instalación multipropósito. En el mismo se representa la secuencia de etapas de este proceso, sus interconexiones y vínculos materiales y energéticos.

---



**Figura 1.** Diagrama de bloques del proceso de producción de surtidos combinados en la instalación multipropósito

Donde: W1 es el flujo másico de raíces alimentadas; W2-D es el flujo másico de raíces desechadas; AL es el flujo de agua de lavado; AL+CC es el flujo de salida de agua de lavado con cáscara y cascarilla; A es la corriente de aditivos incorporados a las galletas de casabe; EH es la humedad extraída de las galletas de casabe; FRA es la fibra separada; G-S es el flujo de gas de secado; G-H es el flujo de gas húmedo y el resto de las corrientes identificadas en el diagrama corresponden a los flujos intermedios de la secuencia operacional del proceso.

Los resultados de la estimación de los parámetros principales de diseño del equipamiento fundamental del proceso combinado y la demanda energética, para cada corrida del DVE, se muestran en la Tabla 2. La producción e índices energéticos se determinaron para 24 horas de operación diaria: distribuidos en 16 horas totales para las etapas de elaboración de casabe, extracción de fibra y secado de harina y 8 horas para el secado del almidón (Pérez, 2018), durante 300 días al año. Dichos resultados se

obtuvieron para una capacidad de tratamiento de raíces de 10 t/día y 113 °C en la alimentación de los gases de secado al equipo neumático.

**Tabla 2.** Resultados del dimensionamiento del equipamiento principal, la producción y demanda energética en la obtención de surtido combinados

<i>Corrida</i>	<i>Producción</i>			<i>Parámetros de diseño de equipos fundamentales por proceso</i>			<i>Demanda energética</i>
	<i>Almidón</i> ( $x_1$ )	<i>Casabe</i> ( $x_2$ )	<i>Harina</i> ( $x_3$ )	$L_C$	$A_H$	$V_S$	<i>Crudo cubano</i>
	<i>(t/año)</i>			<i>m</i>	<i>m<sup>2</sup></i>	<i>m<sup>3</sup></i>	<i>(t<sub>CC</sub>/año)</i>
1	395,07	99,54	379,53	18,00	4,17	3,51	113,41
2	329,71	132,72	475,93	16,70	6,25	3,65	139,42
3	379,67	116,13	395,37	17,43	4,95	3,56	118,22
4	322,21	66,36	542,04	17,81	3,41	3,69	155,26
5	356,38	66,36	475,93	18,05	3,12	3,66	138,47
6	360,28	99,54	443,43	17,52	4,50	3,64	130,65
7	375,63	82,95	427,32	17,90	3,68	3,58	125,91
8	399,26	132,72	348,13	17,33	5,36	3,47	105,87
9	364,29	132,72	411,30	17,03	5,77	3,51	122,02
10	325,91	99,54	508,80	17,23	4,89	3,65	147,08
11	341,15	82,95	492,32	17,65	3,99	3,66	142,88
12	390,97	66,36	411,30	18,28	2,88	3,57	121,56
13	344,99	116,13	459,64	17,10	5,30	3,65	135,03

$L_C$ , longitud de los canales de sedimentación;  $A_H$ , área de horneado;  $V_S$ , volumen del secadero

En los valores reportados se aprecia que las mayores exigencias energéticas están asociadas a los mayores niveles de incorporación de harina en la distribución experimental. Por otra parte, se observa una limitada variabilidad de las demandas de área de los canales de sedimentación y de volumen de la cámara de secado lo cual se debe a los niveles considerados para las variables de optimización, mientras que los niveles productivos considerados para el casabe provocan una variabilidad superior en el área de horneado.

### 3.2. Comportamiento de los indicadores económicos y de rentabilidad del proyecto

En la Tabla 3 se muestran los resultados de la estimación de los indicadores económicos: CI, CTP<sub>SC</sub>, y G, y los indicadores dinámicos de rentabilidad: VAN, TIR y PRD para cada corrida del DVE de segundo orden.

**Tabla 3.** Resultados de la determinación de los indicadores económicos y de rentabilidad en la producción de surtidos combinados

<i>Corrida</i>	<i>CI</i> (USD)	<i>CTP<sub>SC</sub></i> (USD/año)	<i>G</i> (USD/año)	<i>VAN</i> (USD)	<i>TIR</i> (%)	<i>PRD</i> (años)
1	643 634,75	452 663,84	196 722,84	967 977,11	29	4,60
2	665 514,02	468 257,99	197 232,38	958 357,23	28	4,75
3	651 565,49	455 835,46	206 498,88	1 031 622,17	30	4,35
4	639 858,67	475 389,20	118 883,32	425 169,70	19	7,10
5	635 505,80	465 975,32	137 290,23	556 703,86	22	6,10
6	648 354,72	462 470,96	176 718,45	825 054,82	26	5,00
7	639 928,37	459 367,40	166 746,40	760 317,85	26	5,20
8	654 267,17	449 151,37	236 769,18	1 241 902,69	33	3,90
9	659 604,45	458 279,70	216 974,69	1 100 131,13	31	4,25
10	653 573,57	471 713,32	158 050,79	691 216,97	24	5,50
11	644 499,52	468 940,98	147 570,42	623 279,06	23	5,80
12	631 547,82	456 485,53	156 598,45	694 314,85	24	5,40
13	656 865,59	465 361,93	186 953,87	891 594,60	27	4,80

Los resultados presentados demuestran una tendencia a la estabilidad de los CI y los CTP, directamente relacionados con el diseño. Sin embargo, la G y los indicadores dinámicos de rentabilidad se ven impactados por la diferencia de disponibilidad de raíces por surtidos, dada las ventas totales que se alcanzan para cada combinación de producto obtenido en las corridas de DVE. Estos efectos sugieren la existencia de valores óptimos en los intervalos considerados para  $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_3$ .

### 3.3. Parámetros operacionales óptimos

Los modelos matemáticos de segundo orden que relacionan los indicadores económicos de optimización con las variables independientes ( $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ), obtenidos para el diseño aplicado según la ecuación 1, se muestran en las ecuaciones (2), (3), (4) y (5).

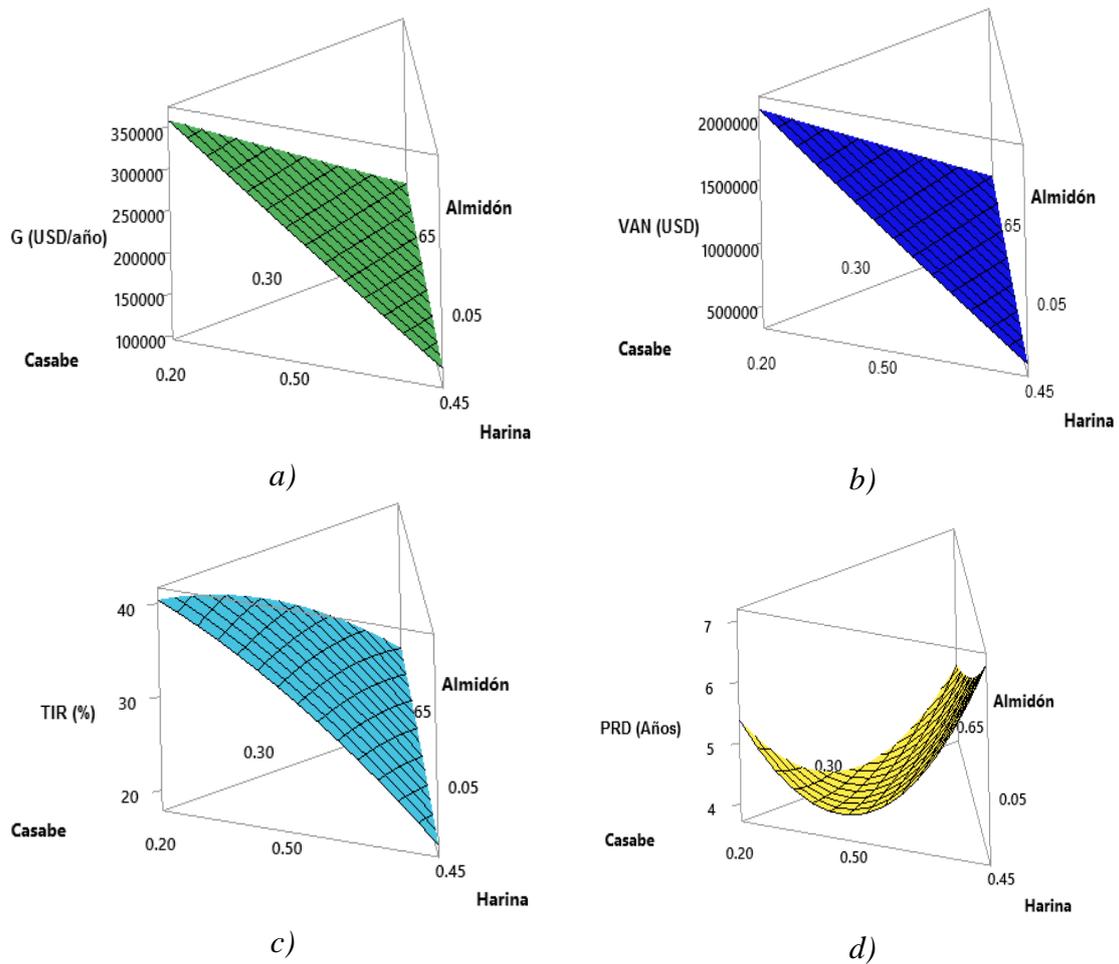
$$G = 254949x_1 + 1,524 \cdot 10^6x_2 - 87818,2 \cdot x_3 - 69750,4 \cdot x_1x_2 - 167397 \cdot x_1x_3 - 262622 \cdot x_2x_3 \quad (2)$$

$$VAN = 1,40255 \cdot 10^6x_1 + 1,0400 \cdot 10^7x_2 - 1,0378 \cdot 10^6x_3 - 831484 \cdot x_1x_2 - 1,1140 \cdot 10^6 \cdot x_1x_3 - 2,5687 \cdot 10^6 \cdot x_2x_3 \quad (3)$$

$$TIR = 16,5325 \cdot x_1 - 166,85 \cdot x_2 - 43,723 \cdot x_3 + 441,558 \cdot x_1x_2 + 88,312 \cdot x_1x_3 + 323,2477 \cdot x_2x_3 \quad (4)$$

$$PRD = 6,84299x_1 + 205,763 \cdot x_2 + 34,5801 \cdot x_3 - 225,474 \cdot x_1x_2 - 38,507 \cdot x_1x_3 - 354,026 \cdot x_2x_3 \quad (5)$$

En la evaluación estadística del grado de ajuste de estos modelos, se verificó que explican significativamente la variabilidad de las respuestas evaluadas con una buena correlación con los valores de origen y un adecuado ajuste para la optimización de los mismos, con coeficientes de regresión ( $R^2$ ) en todos los casos superiores a 95 % y un p-valor inferior a 0,05. En la Figura 2 se muestran las superficies de respuestas estimadas para la relación de los factores independientes con las respuestas evaluadas.



**Figura 2.** Superficies de respuesta para los efectos de las proporciones de la mezcla en las respuestas evaluadas: a) G; b) VAN, c) TIR, d) PRD

La optimización de las respuestas por separado arrojó los mismos valores de los factores independientes en cada caso, resultando una distribución óptima de la disponibilidad de raíces de 60 % para la obtención de almidón, 10 % para casabe y 30 % para harina, lo que representa la máxima disponibilidad para almidón y casabe y la mínima para harina en los rangos de estudio considerados. En estas condiciones se alcanza una producción anual de 399,26 t, 132,72 t y 348,13 t de estos productos respectivamente, de acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla 2 para la corrida 8 del diseño. En la Tabla 4 se muestran los valores máximos alcanzados para la G; VAN, TIR y el valor mínimo para el PRD.

**Tabla 4.** Indicadores económicos y de rentabilidad óptimos en la producción de surtidos combinados

<i>Variables respuestas</i>	<i>G (USD/año)</i>	<i>VAN (USD)</i>	<i>TIR (%)</i>	<i>PRD (años)</i>
Valores óptimos	236 882	1 242 730	33,10	3,97

Los resultados de la optimización del DVE de segundo orden para diferentes condiciones de distribución de la disponibilidad de raíces para la capacidad de planta de 10 t/día, concuerdan con los mejores resultados alcanzados por Pérez (2018). Ello demuestra que la producción combinada es una opción adecuada para fomentar la producción de los surtidos menos ventajosos como el casabe y la harina, en esquemas

donde el surtido fundamental es el almidón. En este caso, dicho resultado permite asegurar que la vía semi-mecanizada facilita que la instalación pueda ser construida en Cuba y tenga resultados adecuados de factibilidad técnico-económica, energética y ambiental.

#### 4. CONCLUSIONES

1. En la producción de surtidos combinados para almidón nativo, casabe y harina pueden acoplarse los esquemas tecnológicos de los procesos independientes en una secuencia de etapas iniciales comunes, donde además se emplea un secado neumático común en los procesos de almidón y harina, en similares condiciones operacionales.
2. Para los límites establecidos en el DVE, cuando se considera los valores máximos de la distribución de yuca para la producción almidón y casabe y el mínimo para la harina, que es el producto de menor valor agregado, se obtiene el mejor comportamiento para la G, el VAN, la TIR y el PRD.
3. En las condiciones operacionales definidas para la vía semi-mecanizada y con la distribución de materia prima que optimiza los indicadores económicos y de rentabilidad, se garantiza la factibilidad de la producción con compatibilidad energética.

#### REFERENCIAS

- Abbas, N., Mohsin Ali, T., & Hasnain, A., A comprehensive review on scope, characteristics and applications of instant starches in food products., *Annals Food Science and Technology*, Vol. 19, No. 1, 2018, pp. 79-86. [https://www.researchgate.net/publication/324976850\\_A\\_COMPREHENSIVE\\_REVIEW\\_ON\\_SCOPE\\_CHARACTERISTICS\\_AND\\_APPLICATIONS\\_OF\\_INSTANT\\_STARCHES\\_IN\\_FOOD\\_PRODUCTS](https://www.researchgate.net/publication/324976850_A_COMPREHENSIVE_REVIEW_ON_SCOPE_CHARACTERISTICS_AND_APPLICATIONS_OF_INSTANT_STARCHES_IN_FOOD_PRODUCTS)
- Acosta, A., Pérez, O., Albernas, Y., y Cortés, M.F., Potencialidades de la metodología de superficie de respuesta en la optimización experimental en la industria química y alimentaria., *Centro Azúcar*, Vol. 48, No. 4, 2021, pp. 123-138. [http://centrozucar.uclv.edu.cu/index.php/centro\\_azucar/article/view/684/782](http://centrozucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/684/782)
- Alarcón, F., y Dufour, D., Almidón agrio de yuca en Colombia., Tomo 1: Producción y Recomendaciones., Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Colombia, 1998, pp. 15-17. <https://cgspace.cgiar.org/rest/bitstreams/39063/retrieve>
- Beovides, Y., Milián, M.D., Rodríguez, D., Gálvez, L., Rodríguez, K., Fernández, M.I., Molina, A., Camejo, M., Arcia, O., Morejón, Z., Oliva, M., Molina, O., Rayas, A., y Basail, M., Cultivares cubanos de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) con rendimiento con rendimiento y potencial genético para la agroindustria., *Centro Agrícola*, Vol. 40, No. 3, 2013, pp. 71-78. [http://cagricola.uclv.edu.cu/descargas/pdf/V40-Numero\\_3/cag123131934.pdf](http://cagricola.uclv.edu.cu/descargas/pdf/V40-Numero_3/cag123131934.pdf)
- Beovides, Y., Milián, M.D., Coto, O., Rayas, A., Basail, M., Santos, A., López, J., Mederos, V.R., Cruz, J.A., Ruix, E., y Rodríguez, D., Caracterización Morfológica y agronómica de cultivares cubanos de yuca (*Manihot esculenta* Crantz)., *Cultivos Tropicales*, Vol. 35, No. 2, 2014, pp. 43-50.
-

- <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v35n2/ctr06214.pdf>
- Ley, N., Contribución a los métodos de asimilar tecnologías, aplicado a un caso de producción de biocombustibles., Tesis presentada en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Especialidad de Ingeniería Química en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba, 2006.
- Ley, N., Pérez, O., y Zuorro, A., Procedimiento para la formulación de oportunidades de negocios. Estudio de casos en la industria, de Villa Clara, Cuba., Revista Universidad y Sociedad, Vol. 13, No. 5, 2021, pp. 319-329. <http://scielo.sld.cu/pdf/rus/v13n5/2218-3620-rus-13-05-319.pdf>
- OCDE-FAO. Perspectivas Agrícolas 2013-2022., Texcoco, Estado de México: Universidad Autónoma Chapingo, 2013. [http://dx.doi.org/10.1787/agr\\_outlook-2013-es](http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2013-es)
- Ortega, D.C., Bustamante, M.O., Gutiérrez, D.F., & Correa, A.A., Mixture experiments in industrial formulations., Dyna, Vol. 82, No. 189, 2015, pp.149-156. <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v82n189/v82n189a19.pdf>
- Pérez, O., Procedimiento estratégico de desarrollo de procesos agroindustriales complementado con asimilación tecnológica aplicado a los productos *de Manihot esculenta Crantz.*, Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Especialidad Ingeniería Química en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba, 2018.
- Pérez, O., Ley, N., González, E., y Valdés, C., Modificación hidrotérmica del almidón de yuca para su empleo como estabilizador de helados., Afinidad., Vol. 74, No. 580, 2017, pp. 275-281. <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/329842>.
- Pérez, O., González, E., Ley, N., García, L., y Miño, J.E., Potencialidad técnico-económica para la producción de casabe en Cuba., + Ingenio, Revista de Ciencia Tecnología e Innovación, Vol. 1, No. 2, 2019, pp. 45-56. <https://revistas.fio.unam.edu.ar/index.php/masingenio/article/view/164/502>
- Pérez, O., Ley, N., y González, E., Procedimiento estratégico de desarrollo de procesos agroindustriales complementado con asimilación tecnológica., Centro Azúcar, Vol. 48, No. 1, 2021, pp. 47-58. [http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro\\_azucar/article/view/641/738](http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/641/738)
- Pérez, O., Acosta, A., González, E., & Ley, N., Optimum economic design of an acetylated gelatinized starch plant from *Manihot esculenta Crantz.*, Afinidad, Vol. 79, No. 596, 2022a, pp. 121-129. <https://doi.org/10.55815/401374>
- Pérez, O., Lorenzo, Y., Acosta, A., y López, I., Diseño optimo económico de una planta de harina con secado neumático de pastas de *Manihot esculenta Crantz.*, Centro Azucar, Vol. 49, No. 1, 2022b, pp. 81-94. [http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro\\_azucar/article/view/693/791](http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/693/791)
- Peters, M.S., & Timmerhaus, K.D., Plant Design and Economics for Chemical Engineers., 4<sup>ta</sup> Ed. Editorial McGRAW-HILL, Singapur, 1991, pp. 137-295.
- Ruz, F., Sánchez, T., Olivera, Y., Rizo, M., y Morales, D., Evaluación agroproductiva de dos clones de *Manihot esculenta Crantz* en la provincia de Matanzas., Pastos y Forrajes, Vol. 44, 2021, pp. 1-8. <http://scielo.sld.cu/pdf/pyf/v44/2078-8452-pyf-44-eE01.pdf>
- Silva, Y.F., Rojas, J.E., Gamboa, J.A., Gordillo, M., y Delvasto, S., Optimización de la
-

resistencia a compresión usando un diseño de mezcla de vértices extremos, en concretos ternarios basados en residuo de mampostería y cal hidratada., Revista EIA, Vol. 16, No. 31, 2019, pp. 99-113. <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/v16n31/1794-1237-eia-16-31-99.pdf>

Sinnott, R., & Tower, G., Chemical Engineering Design., 6<sup>ta</sup> Ed., Butterworth-Heinemann, Estados Unidos, 2020, pp. 275-362. <https://www.elsevier.com/books/chemical-engineering-design/sinnott/978-0-08-102599-4>

Zayas, S., Boeckx, P., y Vargas, H., Comportamiento productivo en agroecosistemas de intercalamiento yuca-frijol en el municipio “Calixto García”, provincia Holguín., Cultivos Tropicales, Vol. 40, No. 1, 2019, e03. <https://www.redalyc.org/journal/1932/193261173003/html/>

## **CONFLICTO DE INTERÉS**

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

## **CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES**

- Ing. Laura Rodríguez Serrano. Investigación.
  - Ing. Amanda Acosta Solares. Investigación, redacción-revisión y edición.
  - Dr.C. Omar Pérez Navarro. Gestión de proyectos, análisis formal, validación.
-