

# The Design of Experiments for the Selection of Providers of Raw Material for a Lemon Juice Processor by Analyzing Physical and Chemical Characteristics

Santiago Chamarro<sup>1</sup>, María del Mar Andrade<sup>1</sup>, Cinthia C. Pérez, Ph.D.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escuela Superior Politécnica Del Litoral, Guayaquil [sjchimar@espol.edu.ec](mailto:sjchimar@espol.edu.ec), [patmaand@espol.edu.ec](mailto:patmaand@espol.edu.ec), [ccperez@espol.edu.ec](mailto:ccperez@espol.edu.ec)

**Summary:** *The correct selection of suppliers is one of the most important decisions for a company and largely determines its success. Our goal is to reduce the complexity and time needed for supplier selection of a concentrated lemon juice processing plant. We use design of experiments to analyse physical and chemical characteristics of the lemons and identify the key factors that should be inspected during quality control operations. The response variable is the amount of juice in ml, and the selected factors are: color, size, and titratable acidity. We analysed the complete design of multiple levels using Minitab software. As a result, the lemon size was identified as the factor that significantly affects the response variable and the best feature combination is to have ripe lemons with a diameter greater than 4 cm and titratable acidity larger than 8%. The benefit from our study relies in the increased effectiveness of the raw material inspection process, due to the identification of key quality factors. As a result quality control operations will need less time, effort and money.*

**Keywords:** *Design of experiments, multi-level design, Lemon, vendor selection.*

%M/KDQSE%SEM

#□

#X□

# Diseño de experimentos para la selección de proveedores de la materia prima de una planta procesadora de jugo de limón analizando características físicas y químicas

Santiago Chimarro<sup>1</sup>, María del Mar Andrade<sup>1</sup>, Cinthia C. Pérez, Ph.D.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escuela Superior Politécnica Del Litoral, Guayaquil sjchimar@espol.edu.ec, patmaand@espol.edu.ec, ccperrez@espol.edu.ec

**Resumen**— La correcta selección de proveedores es una de las decisiones más importantes en una empresa y determina en gran medida el éxito de ésta. Para la selección de proveedores de una planta procesadora de Jugo turbio concentrado de limón se desarrolló un diseño de experimentos analizando características físicas y químicas del limón con el objetivo de reducir el tiempo y complejidad del proceso de selección de proveedores. La variable de respuesta definida fue la cantidad de jugo en ml, y los factores definidos fueron: color, tamaño, y acidez titulable. Seleccionamos el diseño completo de múltiples niveles con el cual obtuvimos 24 corridas en 2 réplicas, y el análisis de los resultados fue realizado con el software Minitab. Como resultado se identificó al factor tamaño, como aquel que afecta significativamente a la variable de respuesta y que la mejor combinación de las características analizadas son limones maduros con un diámetro mayor a 4 cm y con una acidez titulable mayor a 8%. Uno de los mayores beneficios de nuestro estudio, es el aumento en la eficiencia de la inspección de la materia prima para el jugo turbio de limón, reduciendo el tiempo y dinero invertido en el control de calidad, debido a la identificación de factores claves.

**Palabras claves**-- Diseño de experimentos, diseño de múltiples niveles, limón, selección de proveedores.

**Summary:** The correct selection of suppliers is one of the most important decisions for a company and largely determines its success. Our goal is to reduce the complexity and time needed for supplier selection of a concentrated lemon juice processing plant. We use design of experiments to analyze physical and chemical characteristics of the lemons and identify the key factors that should be inspected during quality control operations. The response variable is the amount of juice in ml, and the selected factors are: color, size, and titratable acidity. We analyzed the complete design of multiple levels using Minitab software. As a result, the lemon size was identified as the factor that significantly affects the response variable and the best feature combination is to have ripe lemons with a diameter greater than 4 cm and titratable acidity larger than 8%. The benefit from our study relies in the increased effectiveness of the raw material inspection process, due to the identification of key quality factors. As a result quality control operations will need less time, effort and money.

**Keywords:** Design of experiments, multi-level design, lemon, vendor selection.

## I. INTRODUCCIÓN

La calidad es uno de los principales criterios a tomar en cuenta al momento de evaluar un proveedor [1]. En el Ecuador la selección de proveedores de materia prima es el primer reto que debe asumir una planta industrial, y debido a la falta de mecanismos, guías o métodos claros de selección este proceso se torna aún más complejo.

Los cítricos ocupan el primer lugar de la producción de frutos a nivel mundial. De acuerdo a investigaciones de la FAO (Food and Agriculture Organization por sus siglas en Inglés), la producción mundial de limas y limones en el año 2010 fue de 10,6 millones de toneladas métricas, un incremento del 15 por ciento en comparación a 1996-98[2] y según el portal de estadística “Statista” la producción mundial de limón en el año 2011 fue de 15.167 millones de toneladas y en el año 2014 fue de 17.900 con un incremento del 18% en 3 años, lo cual nos muestra la tendencia a seguir aumentando su consumo conforme pasan los años [3].

En el Ecuador se cultivan limones “Sutil” y “Tahit” para el consumo local y exportación, respectivamente. Entre ambas especies, existen 4405 ha en monocultivo, en 3 257 unidades de producción agropecuarias (UPAs), principalmente en las provincias de Pichincha, Manabí y Guayas, definiendo UPAs como a una extensión de tierra de 500 m<sup>2</sup> o más, dedicada total o parcialmente a la producción agropecuaria, considerada como una unidad económica [4]. De las 350 hectáreas de cultivos de limón sutil en la frontera orense, y de las 1200 ha sembradas en Portoviejo y Santa Ana, en Manabí, no más del 6% están tecnificadas.

La mayoría de los citricultores no reciben asistencia técnica de ninguna institución pública o privada y el manejo de las plantaciones es de carácter artesanal. Los rendimientos son deficientes y están muy por debajo de su potencial de producción de acuerdo a un artículo

científico sobre la producción de limón sutil en la provincia de Santa Elena, Ecuador [5].

El no poseer plantaciones tecnificadas y la pobre asistencia técnica ha ocasionado que las empresas procesadoras de limón en lugar de comprar materia prima a los proveedores sean ellas mismas quienes las producen en su mayoría.

En el mundo la tendencia por el consumo de productos naturales ha aumentado, y el jugo de limón es de gran importancia debido a sus propiedades naturales. Según un estudio agroindustrial, Ecuador posee un mayor potencial exportador de jugo de limón, que de limón fresco y además, forma parte de los 20 países que compiten en la exportación del jugo de limón [6].

Por lo tanto, el tener un método estandarizado de selección de limón es de gran importancia para las empresas productoras de jugo de limón, ya que facilitaría en gran medida la selección de los limones ideales para obtener un mayor rendimiento del producto, ahorrando tiempo y asegurando la efectividad del mismo.

La herramienta seleccionada para este estudio, diseño de experimentos, es versátil y puede ser usada en diferentes campos. Como ejemplos tenemos a Gunasegaram et al. [7] quienes aplicaron diseño de experimentos para reducir los efectos en procesos de fundiciones, Vicente et al. [8] optimizaron el procesamiento de biodiesel utilizando diseño de experimentos y superficie de respuesta y Davim [9] identificó los factores clave para el corte en operaciones de mecanizado. Sin embargo, no hemos encontrado el uso de diseño de experimentos como herramienta para diseñar el proceso de control de calidad de proveedores, particularmente en frutas.

Adicionalmente, el estudio se apoyó de otras herramientas de gestión de calidad para definir los factores para el diseño experimental. Las herramientas usadas fueron el diagrama de Ishikawa y 5 porque, mediante los cuales pudimos diseñar un plan de recolección de datos y el modelo del diseño de experimento.

## II. METODOLOGÍA

Para la llevar a cabo la experimentación, se utilizó el ciclo de Deming como herramienta base, el cual consiste en:

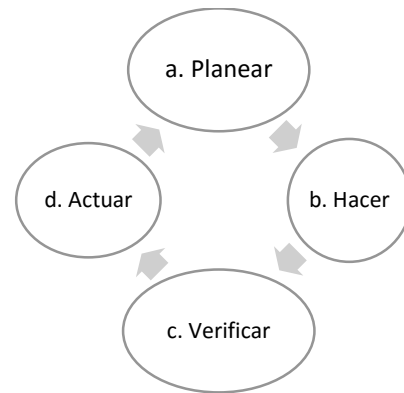


Fig. 1 Ciclo de Deming

### A. Planear

#### 1) Selección de variable de respuesta

Se seleccionó la variable de respuesta a la cantidad de jugo de limón, ya que nos interesa saber cómo los factores influyen en la misma.

#### 2) Selección de factores y niveles

Se realizó un diagrama Ishikawa, analizando las posibles causas que podrían influir de manera significativa en la variable de respuesta. Los factores definidos con sus respectivos niveles son:

- Color: Verde, Pintón y Maduro
- Tamaño: Grande y Pequeño
- Acidez Titulable: Baja y Alta

Estos factores fueron definidos, debido a que se establecen como requisitos para el consumo de la fruta, como para el procesamiento industrial dentro del país, según indica la NTE INEN 1757 [10].

#### 3) Modelo del Experimento

Se procedió a definir el modelo del experimento de forma esquemática, como se detalla en la Sección 3

### B. Hacer

Se creó un diseño general completo, en el cual se realizaron dos réplicas, de 12 combinaciones cada una, como se muestra a continuación:

TABLA 1. CORRIDAS Y RÉPLICAS

Bloques	Color	Tamaño	Acidez Titulable	Cantidad de Jugo
2	Pintón	Pequeño	Baja	13,5
2	Verde	Pequeño	Alta	15,01
2	Maduro	Pequeño	Baja	15,89
2	Verde	Grande	Baja	7,39
2	Pintón	Grande	Baja	27,44
2	Verde	Grande	Alta	21,43
2	Maduro	Grande	Baja	29,95
2	Maduro	Pequeño	Alta	19,95
2	Maduro	Grande	Alta	30,98
2	Verde	Pequeño	Baja	14,59
2	Pintón	Pequeño	Alta	17,55
2	Pintón	Grande	Alta	31,95
1	Maduro	Grande	Baja	29,24
1	Pintón	Grande	Alta	27,6
1	Maduro	Pequeño	Baja	18,6
1	Verde	Grande	Alta	24,35
1	Maduro	Grande	Alta	32,01
1	Pintón	Grande	Baja	28,93
1	Verde	Pequeño	Alta	19,86
1	Pintón	Pequeño	Alta	10,28
1	Pintón	Pequeño	Baja	12,72
1	Verde	Pequeño	Baja	12,33
1	Verde	Grande	Baja	24,7
1	Maduro	Pequeño	Alta	10,06

### C. Verificar

#### 1) Normalidad de los datos

La normalidad de los datos se comprobó por medio del valor p, el cual para debe ser mayor a 0,05 para que los datos sigan una distribución normal.

#### 2) Influencia de los factores en la variable de respuesta

Se analizó la influencia de los datos mediante una tabla ANOVA y Diagrama de Pareto, para conocer la influencia de los factores y sus interacciones con respecto a la variable de respuesta, la cual se determinó mediante valores p y de manera gráfica respectivamente.

#### 3) Verificación de los supuestos de los residuos

Se verificaron los 3 supuestos de los residuos, que son: la normalidad de los residuos, homogeneidad de la Varianza e independencia de los datos.

### D. Actuar

Esta fase se resume en implementar en las plantas procesadoras de jugo de limón los resultados del diseño propuesto, y se encuentra fuera del alcance de nuestro proyecto.

## III. DISEÑO

El modelo para el experimento se resume de forma esquemática en la Figura 2.

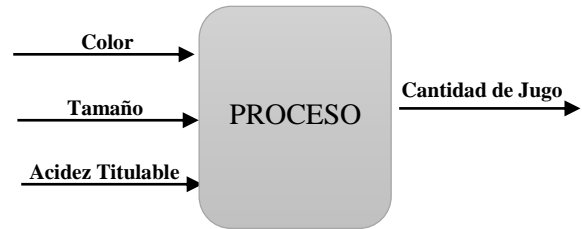


Fig. 1 Proceso

Los niveles de cada factor fueron analizados considerando rangos ni muy juntos ni muy separados, que permitan una correcta aleatorización. [11]

A continuación se detallan los niveles para cada factor estudiado:

#### Color

- Nivel 1: Verde, significa un intenso y uniforme color verde del limón.
- Nivel 2; Pintón, significa variaciones de color verde y amarillo en diferentes tonalidades.
- Nivel 3: Maduro, significa un color amarillo completo en todo el limón [12].

#### Tamaño

- Nivel 1: Pequeño, significa un diámetro ecuatorial menor o igual a 4 cm.
- Nivel 2; Grande, significa un diámetro mayor a 4cm.

#### Acidez titulable

- Nivel 1: Bajo, significa un porcentaje de acidez titulable menor o igual a 8%.
- Nivel 2; Alto, significa un porcentaje de acidez titulable mayor a 8%.

#### Modelo estadístico:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}; \quad (1)$$

$$i = 1,2,3; j = 1,2; k = 1,2 \text{ y } l = 1,2,3$$

#### Donde:

- $\alpha_i, \beta_j$  y  $\gamma_k$  son los efectos principales
- $(\alpha\beta)_{ij}, (\alpha\gamma)_{ik}$  y  $(\beta\gamma)_{jk}$  son los efectos de interacción de dos factores
- $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$  es el efecto de interacción de tres factores
- $\varepsilon_{ijkl}$  es el error aleatorio

#### IV. EXPERIMENTACIÓN

Para cumplir el supuesto de independencia de los errores, las corridas experimentales se las realizó en orden aleatorio [11].

##### A. Materiales y Equipos

- 1) *Muestra:* Frutos de Limón sutil (*Citrus Aurantifolia Swingle*) de diferente madurez (verde, pintón y maduro) y tamaño (grande: mayor a 4 cm y pequeño: menor o igual a 4cm)
- 2) *Materiales:* Matraz de Erlenmeyer, beakers, balones volumétricos, pipetas, peras de succión, exprimidor de limón, cuchara, cuchillo, barra magnética, soporte universal, bureta y pinza mariposa.
- 3) *Equipos:* Balanza analítica, refractómetro, agitador magnético y pH-metro.
- 4) *Reactivos:* Hidróxido de sodio (0,1N) y agua destilada.

##### B. Procedimiento

Para llevar a cabo la experimentación se procedió a separar los limones según su estado de madurez y tamaño, luego se iba seleccionando cada el limón de acuerdo a la combinación establecida en la tabla 1.

##### 1) Determinación de madurez y tamaño

Para determinar el estado de madurez y el tamaño del limón, se tomaron de referencia los datos de la NTE INEN 1757 [10], en donde la madurez se verificó de manera visual y el tamaño mediante la medición del diámetro ecuatorial de la muestra.

##### 2) Determinación de acidez titulable

Tanto la preparación de la muestra y el procedimiento se llevaron a cabo de acuerdo a la NTE INEN ISO 750 [13].

##### 3) Preparación de la muestra

El limón debe ser previamente cortado, exprimido y filtrado utilizando papel filtro como se observa en la Figura 3, para luego tomar una alícuota de 10 ml de jugo filtrado y colocarla en un balón volumétrico de 100 ml, seguido de la dilución con agua destilada hasta completar el volumen.

En el caso de que el jugo filtrado del limón no alcance los 10ml, se puede realizar un procedimiento equivalente, el cual consiste en tomar una alícuota de 5 ml de jugo filtrado y colocarlo en un balón volumétrico de 50 ml, seguido de la dilución con agua destilada hasta completar el volumen.



Fig. 3 Preparación de la muestra para acidez titulable

##### 4) Procedimiento para la determinación de la acidez titulable

Para la determinación de la acidez titulable se aplicó el método potenciométrico, el cual consiste en tomar 50ml de la muestra previamente preparada y colocarla en un beaker de 250ml como se observa en la Figura 4. El beaker debe contener en su interior la barra magnética y ser colocado sobre el agitador magnético, para luego sumergir el electrodo en la muestra e ir adicionando el hidróxido de sodio (0,1N), la adición del reactivo debe ser hasta alcanzar un pH de 8,1.



Fig. 4 Proceso de determinación de acidez titulable

Se debe anotar el volumen consumido y reemplazarlo en la siguiente fórmula:

$$A = \left( \frac{V_1 \times N \times M \times 10}{V_2} \right) \quad (2)$$

$V_1$ : Volumen de hidróxido de sodio usado para la titulación.

$V_2$ : Volumen de alícuota tomada para el análisis.

$N$ : Normalidad de hidróxido de sodio.

$M$ : Mil equivalente del ácido predominante.

$A$ : Gramos de ácido en 1 000 cm<sup>3</sup> de producto.

## VI. VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS

### A. VERIFICACIÓN DE LA NORMALIDAD DE LOS RESIDUOS

Con base en la prueba de normalidad de Anderson-Darling, con un valor p de 0,503 podemos decir que los residuos siguen una distribución normal.

### B. VERIFICACIÓN DE LA HOMOGENEIDAD DE LA VARIANZA

En el gráfico residuos vs ajustes de la Figura 3, podemos ver que no hay tendencias, sinusoides ni forma tipo cono bien marcadas, por lo tanto podemos concluir que se cumple la homogeneidad de la varianza.

### C. VERIFICACIÓN DE LA INDEPENDENCIA DE LOS ERRORES

Para aumentar la posibilidad de que se cumpla la independencia de los errores, se hizo las corridas en orden aleatorio, tanto para la primera como la segunda réplica. También se puede en la gráfica residuos vs orden de observación de la Figura 5, que no existen patrones ni tendencias en sus puntos.

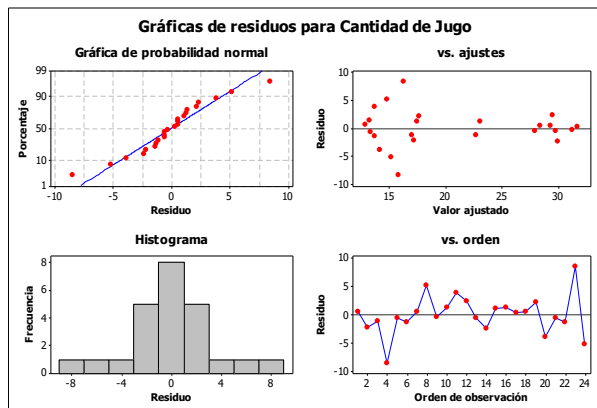


Fig. 5 Gráficas de los residuos

## V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### A. ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE SUS FACTORES PRINCIPALES Y SUS INTERACCIONES

Los valores p de la Tabla 2, muestran cuales de los factores y de sus interacciones afectan estadísticamente a la variable de respuesta: cantidad de jugo de limón.

Con un valor p menor a 0,05 para el factor “tamaño”, podemos decir que afecta significativamente a la variable de respuesta.

TABLA 2: VALOR P DE LOS FACTORES E INTERACCIONES

Análisis de varianza para Cantidad de Jugo, utilizando SC ajustada para pruebas	
Fuente	Valor P
Color	0,09
Tamaño	0
Acidez Titulable	0,301
Color*Tamaño	0,07
Color*Acidez Titulable	0,508
Tamaño*Acidez Titulable	0,525
Color*Tamaño*Acidez Titulable	0,941
S = 4,84295 R-cuad. = 81,60%	

### B. ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN

Como podemos ver el R-cuadrado en el Tabla 2, nos muestra que el modelo propuesto puede captar o explicar aproximadamente el 81,6% de la variación total observada en el diseño con los factores color, tamaño y acidez titulable.

### C. ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN ÓPTIMA DE LOS FACTORES

De acuerdo a la Figura 6 de interacciones para la cantidad de jugo, se puede observar que la mejor interacción es:

- Color: Maduro
- Tamaño: Grande (diámetro mayor a 4 cm)
- Acidez titulable: Alta (mayor a 8%)

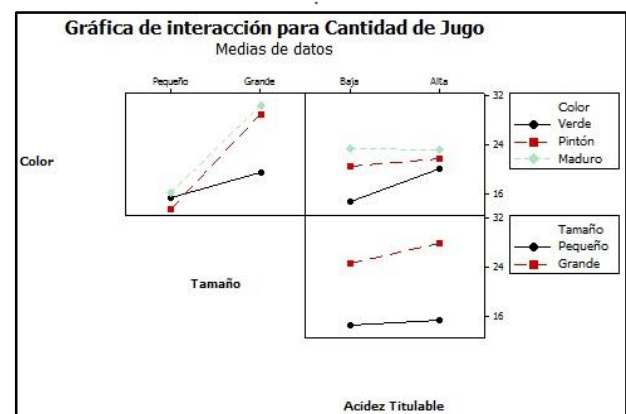


Fig. 6 Interacciones para cantidad de jugo

Con base en los procedimientos realizados, la experimentación y el análisis de los resultados se puede afirmar que el factor que afecta significativamente a la cantidad de jugo de limón es el tamaño del limón. Dicho de otra manera mientras mayor es el tamaño del limón, mayor será la cantidad de jugo.

Además, de acuerdo a las características analizadas, el proveedor deberá entregar limones a su cliente con un tamaño mayor a 4 cm, en estado maduro (color amarillo) y un porcentaje de acidez titulable mayor al 8%, para producir la mayor cantidad de jugo.

Finalmente el modelo desarrollado puede captar o explicar aproximadamente el 81,6% de la variación total, lo cual valida el modelo presentado.

Con los resultados mostrados las empresas ecuatorianas que procesan jugo de limón pueden usar este mecanismo de selección de proveedores y de esta manera asegurar una mayor extracción de jugo de limón.

## VII. CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

Se ha propuesto una nueva forma de evaluar proveedores de limón que esta soportada por análisis estadísticos, que demuestran la influencia de factores tanto físicos y químicos en la cantidad de jugo. Además, el presente estudio nos permite conocer los niveles deseables de cada factor, con los cuales se obtiene la mayor cantidad de jugo, esto permitirá a las plantas procesadoras de limón reducir tiempos de control de calidad en la recepción de la materia prima y además mejorar la eficiencia de la extracción de jugo de limón de una forma práctica y sostenible.

Los factores tamaño y color pueden ser verificados en todos los limones recibidos, pero la acidez titulable puede ser evaluada siguiendo un plan de muestreo.

La madurez de los limones se aprecia visualmente por su color externo. Su estado se puede confirmar estableciendo la acidez titulable de acuerdo a lo mencionado en la norma NTE INEN 1757 (2008). Por tal motivo es importante desarrollar nuevas investigaciones que permitan encontrar el porcentaje de acidez titulable máximo, con el cual se extrae la mayor cantidad de jugo, ya que después de este valor la cantidad de jugo decrece considerablemente, debido a la fase de maduración final del limón. Dicho de otra manera, si bien los limones maduros producen más jugo que los menos maduros, existe un punto de decrecimiento en la relación entre madurez y producción de jugo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran agradecer a la Ing. Janaina Sánchez García, por su valiosa ayuda durante la ejecución de los experimentos en el laboratorio. Adicionalmente agradecemos a los revisores por sus oportunos comentarios que ayudaron a mejorar este trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] J. T. Guilló, *Calidad Total, fuente de ventaja competitiva*, Murcia-España: Espagrafic, 2000, pp. 251-260.
- [2] (2010) FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). Estadísticas agrícolas. Disponible en: <http://www.fao.org/statistics/es/>
- [3] (2015) Statista. Producción mundial de limón. Disponible en: <http://es.statista.com/estadisticas/529261/produccion-mundial-de-limones/>
- [4] (2014). Archivo Nacional de Datos y Metadatos Estadísticos. Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua. Disponible en: <http://anda.inec.gob.ec/anda/index.php/catalog/266>
- [5] N. Orrala, A. Solís, M. Tomalá, "Efecto NKP en la producción de limón sutil en Sinchal", (2010).
- [6] Unidad Técnica de Estudios para la Industria (UTEPI), *Lima y Limón. Estudio Agroindustrial en el Ecuador: Competitividad de la Cadena de Valor y Perspectivas de Mercado*, Programa Integrado MICIP-ONUUI, Quito-Ecuador, 2006, pp. 33-51.
- [7] Gunasegaram, D. R., D. J. Farnsworth, and T. T. Nguyen, "Identification of critical factors affecting shrinkage porosity in permanent mold casting using numerical simulations based on design of experiments," *Journal of materials processing technology* 209.3, 2009, 1209-1219.
- [8] Vicente, Gemma, et al, "Application of the factorial design of experiments and response surface methodology to optimize biodiesel production," *Industrial crops and products* 8.1, 1998, 29-35.
- [9] Davim, J. Paulo, "A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments," *Journal of materials processing technology* 116.2, 2001, 305-308.
- [10] Instituto Ecuatoriano de Normalización. Norma: NTE INEN 1757, 2008. Disponible en: <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ecibr/ec.nte.1757.2008.pdf>
- [11] R. O. Kuhel, *Diseño de experimentos Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación*, D.F., México: Thompson Editors S.A., 2001, pp. 5-31.
- [12] D. C. Montgomery, *Diseño y Análisis de Experimentos*. Arizona: Limusa S.A. 2004, pp. 124-145.
- [13] Instituto Ecuatoriano de Normalización. Norma: NTE INEN ISO 750, 2013. Disponible en: [http://www.normalizacion.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2014/NORMAS\\_2014/AOC/08092014/nte\\_inen\\_iso\\_750\\_extracto.pdf](http://www.normalizacion.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2014/NORMAS_2014/AOC/08092014/nte_inen_iso_750_extracto.pdf)