



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ESTADÍSTICA**

**TESIS**

**CONTROL DE CALIDAD DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN A  
TRAVÉS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL EN ESTUDIOS DE  
REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD DE LA SAL DE MARAS  
EN CUSCO, 2023**

**PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN  
ESTADÍSTICA**

**AUTOR:**

**Br. HENRRY AYTE MORALES**

**ASESORA:**

**Mgt. RINA MARICELA ZAMALLOA CORNEJO**

**CODIGO ORCID: 0000-0002-9850-7998**

**CUSCO – PERÚ**

**2025**

# INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, Asesor del trabajo de investigación/tesis titulada: CONTROL DE CALIDAD DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN A TRAVÉS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL EN ESTUDIOS DE REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD DE LA SAL DE MAZAS EN CUSCO, 2023

Presentado por: HENRY AYTE MORDLES DNI N° 48910007

presentado por: ..... DNI N°: .....

Para optar el título profesional/grado académico de MAESTRO EN ESTADÍSTICA

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 3.....%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 15 de MAYO de 2025

Firma

Post firma RINA MAICELA ZAVALLLOS CORNEJO

Nro. de DNI 23804669

ORCID del Asesor 0000-0002-9850-7998

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259:459439951

# Henry Ayte

## CONTROL DE CALIDAD DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN A TRAVÉS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL EN ESTUDIOS DE REPE...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:459439951

135 Páginas

Fecha de entrega

15 may 2025, 6:06 a.m. GMT-5

29.283 Palabras

160.874 Caracteres

Fecha de descarga

15 may 2025, 6:12 a.m. GMT-5

Nombre de archivo

CONTROL DE CALIDAD DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN A TRAVÉS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL EN E....pdf

Tamaño de archivo

1.9 MB

# 3% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

## Filtered from the Report

- Bibliography
- Quoted Text
- Cited Text
- Small Matches (less than 15 words)

## Top Sources

- 2%  Internet sources
- 0%  Publications
- 2%  Submitted works (Student Papers)

## Integrity Flags

### 0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.



# UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

## ESCUELA DE POSGRADO

### INFORME DE LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES A TESIS

Dra. NELLY AYDE CAVERO TORRE, Directora (e) General de la Escuela de Posgrado, nos dirigimos a usted en condición de integrantes del jurado evaluador de la tesis intitulada CONTROL DE CALIDAD DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN A TRAVÉS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL EN ESTUDIOS DE REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD DE LA SAL DE MARAS EN CUSCO, 2023 de la Br. Br. HENRRY AYTE MORALES. Hacemos de su conocimiento que el (la) sustentante ha cumplido con el levantamiento de las observaciones realizadas por el Jurado el día NUEVE DE JUNIO DE 2025.

Es todo cuanto informamos a usted fin de que se prosiga con los trámites para el otorgamiento del grado académico de MAESTRO EN ESTADÍSTICA.

Cusco, 16 de junio del 2025

  
DR. GUILLERMO PAUCAR CARLOS  
Primer Replicante

  
MGT. EDGAR CENTENO HUAMANI  
Segundo Replicante

  
DRA. KARLA ZELMIRA APARICIO ARENAS  
Primer Dictaminante

  
MGT. JUDITH DURAN HUAMAN  
Segundo Dictaminante

## **Dedicatoria**

A mi esposa Biviana, por su amor, paciencia y su respaldo a lo largo de este proceso ha sido invaluable. Tu comprensión y ánimo me han dado la fuerza constante en cada etapa del camino. A mis hijos, Joseph Anthony y Carol Alexandra, por su alegría y motivación. Sin ustedes, este logro no habría sido posible. Agradezco que sean mi fuente de inspiración y el motivo que me impulsa a seguir avanzando.

A mis padres, Antonio y Belén, por su amor incondicional y su apoyo sin límites. Gracias por inculcarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. A mis hermanos, por su ánimo constante. Este logro es también el resultado de su apoyo y afecto.

## **Agradecimientos**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Mgt. Rina Zamalloa Cornejo, quien ha sido una guía fundamental en mi trayectoria académica. Como asesora de mi tesis y docente, su apoyo incondicional, paciencia y sabiduría han sido cruciales para enfrentar los desafíos de este proceso. Agradezco profundamente su constante motivación y las valiosas enseñanzas que me brindó, las cuales me impulsaron a dar lo mejor de mí en cada etapa de este trabajo. Sin su ayuda y dedicación, este logro no habría sido posible.

## CONTENIDO

DEDICATORIA .....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
CONTENIDO .....	IV
LISTA DE TABLAS .....	VII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
RESUMEN .....	XI
ABSTRACT .....	XII
CAPITULO I.....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1. Situación Problemática .....	1
1.2. Formulación del Problema .....	3
a. Problema general .....	3
b. Problemas específicos.....	3
1.3. Justificación de la Investigación .....	3
1.3.1. Conveniencia.....	3
1.3.2. Implicancias prácticas.....	3
1.3.3. Relevancia social y económica .....	4
1.3.4. Valor teórico .....	4
1.3.5. Utilidad metodológica .....	4
1.4. Objetivos de la Investigación .....	5
a. Objetivo general.....	5
b. Objetivos específicos.....	5
CAPITULO II.....	6
MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL .....	6
2.1. Bases Teóricas .....	6
2.1.1. Calidad .....	6
2.1.2. Control de calidad.....	6
2.1.3. Control estadístico de calidad .....	7
2.1.3.1. Diagramas de control de calidad.....	7
2.1.3.1.1. Diagramas de control para medias de proceso $\bar{x}$ .....	7
2.1.3.1.2. Diagramas de control para la variabilidad de proceso $R$ .....	9
2.1.3.2. Análisis de capacidad de procesos.....	11
2.1.4 Sistemas de medición .....	14
2.1.4.1. Variabilidad de un sistema de medición .....	16
2.1.4.2. Errores de un sistema de medición .....	16

2.1.4.3. Proporciones de un sistema de medición .....	20
2.1.4.3.1. Precisión tolerancia (P/T).....	20
2.1.4.3.2. Precisión a la tolerancia total (P/TV).....	21
2.1.4.3.3. Coeficiente de correlación intraclase $ICC = \rho$ .....	21
2.1.4.3.4. Número de categoría distintas $ndc$ .....	22
2.1.4.4. Impacto del R&R sobre el índice de capacidad potencial $C_p$ .....	23
2.1.5. Diseño de Experimentos (DOE) .....	25
2.1.5.1. Metodología a emplear para el diseño de experimentos .....	25
2.1.5.2. Determinación del modelo estadístico .....	25
2.1.5.2.1. Diseño de experimentos con modelos mixtos con dos factores .....	25
2.1.5.2.2. Diseño de factores con modelos Mixtos con tres factores .....	28
2.1.5.2.3. Supuestos del modelo.....	33
2.1.5.2.4. Comparaciones o pruebas de rango múltiples .....	34
2.1.6. Métodos estadísticos para el análisis de Repetibilidad y Reproducibilidad.....	35
2.1.6.1. Método de los promedios y rangos.....	35
2.1.6.2. Estudios Repetibilidad y Reproducibilidad con el método de ANOVA.....	40
2.1.6.2.1. Estudios de Repetibilidad y Reproducibilidad por método ANOVA para dos factores.....	40
2.1.6.2.2. Estudios de Repetibilidad y Reproducibilidad para tres factores .....	44
2.1.7. Empresa Marasal S.A .....	45
2.1.7.1. Instalación y medios operativos.....	45
2.1.7.2 Producto .....	46
2.2. Marco Conceptual.....	47
2.3. Antecedentes Empíricos de la Investigación .....	49
2.3.1. Antecedentes Internacionales.....	49
2.3.2. Antecedentes Nacionales .....	51
2.3.3. Antecedentes Locales .....	53
2.4 Hipótesis .....	54
a. Hipótesis General.....	54
b. Hipótesis Específicas .....	54
2.5. Identificación de Variables e Indicadores .....	54
2.6. Operacionalización de Variables.....	55
CAPITULO III .....	56
METODOLOGÍA.....	56
3.1. Ámbito de estudio: Localización Política y Geográfica .....	56
3.2. Tipo y Nivel de Investigación .....	57

3.3. Unidad de Análisis .....	57
3.4. Determinación del Tamaño de Muestra .....	57
3.5. Técnicas de Selección de Muestra .....	58
3.6. Técnicas de Recolección de Información .....	59
3.7. Técnicas de Análisis e Interpretación de la Información .....	59
CAPITULO IV .....	61
RESULTADOS .....	61
4.1. Procesamiento y Análisis e Interpretación de Resultados de Exploración de Datos.....	61
4.2. Procesamiento, Análisis e Interpretación Resultados Diseños Factoriales (DOE) .....	64
4.2.1. Resultado del diseño factorial mixto de dos factores .....	64
4.2.2. Resultado del diseño factorial mixto con tres factores .....	71
4.3. Procesamiento, Análisis e Interpretación Resultados del Estudio de Repetibilidad & Reproducibilidad.....	77
4.3.1. Estudio R&R para analizar los pesos de sal utilizando la balanza 1 .....	77
4.3.2. Estudio R & R cruzado para los pesos de sal con balanza 2 .....	85
4.3.3. Estudio R & R sistemas de medición Expandido con los tres factores.....	91
DISCUSIÓN .....	101
CONCLUSIONES .....	107
SUGERENCIAS .....	109
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	110
ANEXOS .....	121
Anexo 1: Matriz de consistencia .....	121
Anexo 2: Formato de registro recolección de información .....	123

## Lista de tablas

<b>Tabla 1:</b> ANOVA de dos factores mixtos.....	27
<b>Tabla 2:</b> Prueba de hipótesis de tres factores mixtos fijos y aleatorios. ....	29
<b>Tabla 3:</b> ANOVA de tres factores mixtos.....	31
<b>Tabla 4:</b> Esperanza de los cuadrados medios de los tres factores mixtos.....	32
<b>Tabla 5:</b> Valores de las constante $k_1$ y $k_2$ .....	37
<b>Tabla 6:</b> Porcentaje de contribución de factores a la variabilidad total. ....	39
<b>Tabla 7:</b> ANOVA para un sistema de medición. ....	42
<b>Tabla 8:</b> Porcentaje de contribución de variación mediante ANOVA.....	43
<b>Tabla 9:</b> ANOVA para un Sistema de Medición. ....	44
<b>Tabla 10:</b> Operacionalización de variables .....	55
<b>Tabla 11:</b> Pesos de sal de 1000 gramos con balanza 1 .....	61
<b>Tabla 12:</b> Pesos de sal de 1000 gramos con balanza 2 .....	63
<b>Tabla 13:</b> Información de factores .....	64
<b>Tabla 14:</b> Análisis de varianza ANOVA para dos factores mixtos operarios y partes en sistema de medidas de pesos de sal.....	66
<b>Tabla 15:</b> Comparación de medias para las partes (producto) en los sistemas de pesos de sal través de la prueba Tukey y una confianza de 95% .....	67
<b>Tabla 16:</b> Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95% .....	68
<b>Tabla 17:</b> Componente de varianza. ....	71
<b>Tabla 18:</b> Información de los factores .....	71
<b>Tabla 19:</b> Análisis de varianza ANOVA para tres factores mixtos de medidas de pesos de sal .....	74
<b>Tabla 20:</b> Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95% .....	75
<b>Tabla 21:</b> Componentes de la varianza, utilizando SC ajustado.....	77

<b>Tabla 22:</b> ANOVA de dos factores con interacción .....	78
<b>Tabla 23:</b> Componentes de variación y porcentaje de contribución de sal con balanza 1 .....	79
<b>Tabla 24:</b> Porcentajes de variación de los sistemas de pesos de sal con balanza 1 .....	80
<b>Tabla 25:</b> ANOVA de dos factores con interacción con medidas de pesos de sal de 1000 gramos con balanza 2.....	85
<b>Tabla 26:</b> Componentes de la varianza y porcentaje de contribución de pesos con balanza 2 .....	86
<b>Tabla 27:</b> Evaluación del sistema de medición de porcentaje de variación de pesos con balanza 2. ....	87
<b>Tabla 28:</b> Información de los factores .....	91
<b>Tabla 29:</b> ANOVA con Todos los Términos en Sistemas de Pesos. ....	92
<b>Tabla 30:</b> ANOVA con los Términos Aplicado para los Cálculos de R&R del Sistema de Pesos. ....	93
<b>Tabla 31:</b> Componentes de variación.....	94
<b>Tabla 32:</b> Evaluación del sistema de medición porcentaje de variación .....	95

## Lista de figuras

<b>Figura 1</b> Precisión y exactitud de un sistema de medición.....	15
<b>Figura 2</b> Componente de sesgo del sistema de medición .....	17
<b>Figura 3</b> Componente de linealidad del sistema de medición .....	18
<b>Figura 4</b> Componente de estabilidad .....	18
<b>Figura 5</b> Componente de repetibilidad en el sistema de medición. ....	19
<b>Figura 6</b> Componente de reproducibilidad de sistema de medición.....	19
<b>Figura 7</b> Control de Sistemas de Medida de la Sal en sus Diferentes Presentaciones.....	47
<b>Figura 8</b> Ubicación geográfica de la empresa de Marasal S.A.....	56
<b>Figura 9</b> Gráfica Q- Q plot de los pesos de la sal de 1000 gr. ....	62
<b>Figura 10</b> Gráfica Q- Q plot de los pesos de la sal de 1000 gr. ....	63
<b>Figura 11</b> Supuesto de normalidad .....	65
<b>Figura 12</b> Supuesto de varianza constante (Homocedasticidad) .....	65
<b>Figura 13</b> Supuesto de independencia. ....	66
<b>Figura 14</b> ICS simultáneos de 98% de Tukey en Diferencia de las Medias para los Pesos de la Sal.....	69
<b>Figura 15</b> Gráfica de efectos principales para los pesos .....	70
<b>Figura 16</b> Diagrama de Pareto de efectos estándares .....	70
<b>Figura 17</b> Supuesto de probabilidad normal .....	72
<b>Figura 18</b> Supuesto de Varianza Constante .....	72
<b>Figura 19</b> Supuesto de independencia .....	73
<b>Figura 20</b> Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.....	76
<b>Figura 21</b> Gráfica de corridas de sistemas de medidas de los pesos con la balanza 1.....	81
<b>Figura 22</b> Componentes de variación de R&R en pesos de sal con balanza I.....	82
<b>Figura 23</b> Gráfica de rangos y medias por operario para los pesos de sal con balanza 1 .....	82

<b>Figura 24</b> Mediciones por número de partes en pesos de la sal con la balanza 1 .....	83
<b>Figura 25</b> Diagrama de cajas de sistema de pesos por operario .....	84
<b>Figura 26</b> Gráfica de interacción entre los operarios y por número de partes .....	84
<b>Figura 27</b> Gráfica de corridas de los sistemas de medición de los pesos con alanza 2 .....	88
<b>Figura 28</b> Componentes de variación de R&R en pesos de sal con balanza 2 .....	89
<b>Figura 29</b> Gráfica de rangos y medias por operario para los pesos de sal con balanza 2 .....	89
<b>Figura 30</b> Mediciones por número de partes en pesos de la sal con la balanza 2 .....	90
<b>Figura 31</b> Diagrama de cajas de sistema de pesos por operario .....	90
<b>Figura 32</b> Gráfica de interacción entre los operarios y por número de partes .....	91
<b>Figura 33</b> Componentes de variación en sistemas de pesos R&R expandido .....	96
<b>Figura 34</b> Gráficas de control de rangos y medias por operario en sistemas de pesos expandida .....	97
<b>Figura 35</b> Sistemas de mediciones expandidas por número de partes .....	98
<b>Figura 36</b> Diagrama de cajas de sistema de pesos expandidas por operario .....	98
<b>Figura 37</b> Diagrama de cajas de sistema de pesos expandidas por balanza .....	99
<b>Figura 38</b> Gráfica de interacción en sistemas de pesos expandida entre parte y operario.....	99
<b>Figura 39</b> Gráfica de interacción en sistemas de pesos expandida entre las balanzas y partes .....	100
<b>Figura 40</b> Gráfica de interacción en sistemas de pesos expandida entre operador y balanza. .....	100

## Resumen

El trabajo de investigación tuvo como objetivo principal evaluar la calidad del sistema de medición de la sal de Maras mediante un diseño experimental en estudios de repetibilidad y reproducibilidad. La metodología de la investigación fue de tipo cuantitativo, con un enfoque descriptivo y correlacional, destinada a analizar el control de calidad de los sistemas de medición de la sal de Maras. Se caracteriza por ser no experimental y transversal, ya que se recolectaron datos en un único momento, observando los fenómenos en su entorno natural sin intervención. La unidad de análisis fue las bolsas de sal de 1000 gramos, y la población estuvo constituida por todos los paquetes de bolsas de sal. Se seleccionó una muestra de 10 bolsas de sal, 3 operadores y 2 balanzas, la técnica de muestreo fue probabilística aleatoria simple para los operarios, las balanzas y bolsas fue de una forma fija. La recolección de datos se realizó mediante un diseño experimental cruzado y expandido, donde cada operador realizó tres repeticiones con dos balanzas, asegurando aleatoriedad en las mediciones. El estudio evidenció como resultado que el componente parte representa la principal fuente de variación en el proceso de medición, con un 96.05% de contribución a la variabilidad total. Las fuentes secundarias de variación, como la repetibilidad, reproducibilidad, operarios y balanzas, aportaron el 3.95% y el sistema de medición mostró un sistema de medición R&R de 19.89%. La ANOVA indica que el modelo estadístico es muy significativo con,  $p < 0.05$ , y los indicadores de ajuste reflejan un desempeño sobresaliente, con un  $R^2 = 99.38\%$ . Los hallazgos muestran como conclusión el sistema de medición de los pesos de la sal de Maras muestra un desempeño aceptable en términos de repetibilidad y reproducibilidad, los estudios ampliados o expandidos de repetibilidad y reproducibilidad R&R, combinados con un diseño factorial general, facilitaron un análisis integral de la variabilidad del sistema de medición.

## PALABRAS CLAVES

Sistema de medición, Diseño experimental, Estudios R&R, Sal de Maras

## Abstract

The main objective of this research was to evaluate the quality of the Maras salt measurement system through an experimental design focused on repeatability and reproducibility (R&R) studies. The research methodology was quantitative, with a descriptive and correlational approach, aimed at analyzing the quality control of the Maras salt measurement systems. It was characterized as non-experimental and cross-sectional, since data were collected at a single point in time, observing the phenomena in their natural environment without intervention. The unit of analysis was 1000-gram salt bags, and the population consisted of all salt bag packages. A sample of 10 salt bags, 3 operators, and 2 scales was selected. The sampling technique was simple random probability for the operators, while the selection of scales and bags was fixed. Data collection was carried out using a crossed and expanded experimental design, where each operator performed three repetitions using two scales, ensuring randomness in the measurements. The results showed that the "part" component was the main source of variation in the measurement process, contributing 96.05% to the total variability. Secondary sources of variation, such as repeatability, reproducibility, operators, and scales, contributed 3.95%, and the measurement system showed an R&R value of 19.89%. The ANOVA indicated that the statistical model was highly significant ( $p < 0.05$ ), and the goodness-of-fit indicators reflected outstanding performance, with an  $R^2 = 99.38\%$ . The findings conclude that the Maras salt weight measurement system demonstrates acceptable performance in terms of repeatability and reproducibility. The extended R&R studies, combined with a general factorial design, enabled a comprehensive analysis of the measurement system's variability.

## Keywords

Measurement system, Experimental design, R&R studies, Maras salt

## CAPITULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1. Situación Problemática

La demanda mundial de alimentos seguros y de calidad ha crecido, destacando la importancia de la seguridad alimentaria. Mientras los países industrializados disponen de sistemas robustos para cumplir con los estándares de calidad, los países en desarrollo tienen controles básicos que requieren mejoras, lo cual genera una brecha que amenaza la salud pública y limita su competitividad en el mercado global (Perez, 2018). La producción de sal es importante en el comercio global, pero algunos grandes productores enfrentan dificultades para aplicar controles de calidad eficaces. China lidera con el 25% de la producción mundial, seguido por Estados Unidos 14% e India 9%. A pesar de los esfuerzos por garantizar la calidad, en las regiones en desarrollo la falta de infraestructura, regulaciones y conocimientos técnicos dificulta implementar estándares estrictos (Fernández, 2024). En América Latina, países como Chile, México, Brasil y Perú enfrentan dificultades similares, agravadas por una débil regulación sanitaria y la falta de control en los sistemas de medición, lo que limita su competitividad en mercados exigentes.

Según la FAO (2022), la calidad y seguridad alimentaria en Perú son esenciales para responder a la demanda nacional e internacional. Sin embargo, persisten deficiencias en el control de calidad, especialmente en la producción de sal, recurso estratégico administrado en gran parte por la empresa Quimpac S.A. De acuerdo con el INS (2020), la sal se produce principalmente en Piura, Lambayeque, Ica y Arequipa, regiones donde las limitaciones tecnológicas y el escaso conocimiento sobre inocuidad afectan la calidad del producto, poniendo en riesgo la salud del consumidor y reduciendo la competitividad en el mercado.

En la región del Cusco, las salineras de Maras administrado por la asociación Marasal S.A. presentaron deficiencias en el control de calidad, particularmente en los sistemas de

medición del peso, a pesar de su reconocimiento por la producción artesanal de sal con valor cultural y comercial. Entre las causas identificadas estuvieron la tecnología inadecuada, el desconocimiento de normas técnicas de calidad, y la ausencia de supervisión por parte de entidades como INACAL o DIGESA. Estas condiciones podrían tener consecuencias como la pérdida de confianza por parte de los consumidores, limitaciones para acceder a mercados formales e internacionales y riesgos de sanciones legales. Este estudio permitió evaluar objetivamente el sistema de medición a través de diseños de repetibilidad y reproducibilidad, identificar la variabilidad en los resultados generados por los operadores y establecer una base técnica que sirviera para orientar decisiones de mejora. Asimismo, contribuya en el ámbito académico y metodológico con información relevante para futuras investigaciones sobre control de calidad en procesos de sistemas de medición.

Para la distribución y comercialización de la sal de Maras, es esencial contar con un sistema de medición que garantice la consistencia en sus pesos de los productos de las diferentes presentaciones del producto un kilo, medio kilo y sacos, empleando balanzas industriales para llevar a cabo estas mediciones. Para evaluar las mediciones del peso del producto de sal de Maras, se deberá llevar a cabo un análisis estadístico de la repetibilidad y reproducibilidad de los sistemas de medición, lo que permitirá disminuir la variabilidad y mejorar la precisión. En estos sistemas de medición, se emplearán herramientas como diagramas de control, análisis de capacidad del sistema, métodos de promedios y rangos, ANOVA y diseños experimentales. Estas técnicas permitirán optimizar la precisión y consistencia en la medición del peso de los productos, garantizando la repetibilidad y reproducibilidad del sistema.

## **1.2. Formulación del Problema**

### ***a. Problema general***

¿Cómo es la calidad del sistema de medición de la sal de Maras mediante un diseño experimental en estudios de repetibilidad y reproducibilidad?

### ***b. Problemas específicos***

1. ¿Cuáles son los coeficientes de repetibilidad y reproducibilidad entre los operadores en los sistemas de medición de sal de Maras, 2023?
2. ¿Cuáles son las interacciones entre los factores operador, instrumento y parte del sistema de medición de la sal de Maras, 2023?
3. ¿Qué patrones mostrarán los diagramas de control de calidad en el monitoreo de la repetibilidad y reproducibilidad en los sistemas de medición de sal de Maras, 2023?

## **1.3. Justificación de la Investigación**

### ***1.3.1. Conveniencia***

La investigación identifica y corrige deficiencias en los sistemas de medición, lo cual es esencial para asegurar la precisión en el proceso de producción. Esto beneficiará a la empresa Marasal SA, mejorando la efectividad en las operaciones y su aptitud para alcanzar con los estándares internacionales. La investigación es conveniente porque aporta a prevenir los problemas críticos en el control de calidad y tiene un potencial positivo significativo para la salud pública, la competitividad industrial.

### ***1.3.2. Implicancias prácticas***

En esta investigación es importante evaluar la supervisión de los sistemas de medición de la sal de Maras, como respuesta al incremento de la demanda alimenticia. La insuficiencia de controles de calidad, especialmente los sistemas de medición en pesos de sus productos y la carencia de infraestructura impacta negativamente en la salud pública y disminuye la

competitividad en el mercado. A través de un análisis de repetibilidad y reproducibilidad R&R se optimizarán los procesos productivos, asegurando la uniformidad del producto.

### ***1.3.3. Relevancia social y económica***

Esta investigación tiene como objetivo salvaguardar la salud pública a través de la optimización de la calidad de la sal. Asegurando que la empresa Marasal realice análisis de sistemas de medición para garantizar pesos precisos que no perjudiquen a los consumidores. Esto beneficiará a los clientes al minimizar los riesgos asociados con productos de controles inadecuados. Desde un enfoque económico, un control de calidad efectivo incrementará la competitividad de la sal en los mercados nacionales e internacionales, generando mayores ingresos, mejorando las condiciones de los productores y fomentando el desarrollo económico de la empresa.

### ***1.3.4. Valor teórico***

El valor teórico se basa en conceptos de calidad, análisis de sistemas de medición MSA y estadística R&R, ofreciendo un marco integral para mejorar la producción de sal en Maras y su impacto en la salud y la economía local.

### ***1.3.5. Utilidad metodológica***

El estudio se centra en el control de calidad de los sistemas de pesaje en la producción de sal en Maras mediante el Análisis de Sistemas de Medición MSA. Evalúa la precisión y consistencia, priorizando la repetibilidad y reproducibilidad R&R para minimizar la variabilidad en las mediciones de peso, empleando herramientas estadísticas como Rango, diseños experimentales y ANOVA.

## **1.4. Objetivos de la Investigación**

### ***a. Objetivo general***

Evaluar la calidad del sistema de medición de la sal de Maras mediante un diseño experimental en estudios de repetibilidad y reproducibilidad.

### ***b. Objetivos específicos***

1. Determinar los coeficientes de repetibilidad y reproducibilidad entre los operadores en los sistemas de medición de la sal de Maras, 2023.
2. Determinar las interacciones entre los factores operador, balanza y parte en los sistemas de medición de la sal de Maras, 2023.
3. Determinar patrones de control de calidad en el monitoreo de la repetibilidad y reproducibilidad en los sistemas de medición de sal de Maras, 2023.

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

#### 2.1. Bases Teóricas

##### 2.1.1. Calidad

La calidad de un producto o servicio se define por sus características, que determinan su capacidad para satisfacer las necesidades del cliente, ya sean directas o implícitas, a través de su uso o disfrute (Rendón, 2013). Considera la calidad como el cumplimiento de los requisitos, con un estándar innegociable de cero defectos, sus experiencias demuestran que todos los empleados pueden ser incentivados a mejorar, siempre que cuenten con las herramientas adecuadas para aprender a hacerlo (Gryna et al., 2027)

El Dr. W. Edwards Deming es reconocido como el pionero del movimiento moderno de calidad, cuyas contribuciones han influido profundamente en organizaciones a nivel global, estableciendo la calidad como una ventaja competitiva esencial. Deming sostenía que la calidad abarca productos, servicios, procesos y personas, resaltando la mejora continua y el rol fundamental de la alta dirección en impulsar una cultura de calidad (Araujo, 2023).

##### 2.1.2. Control de calidad

Rendón (2013) manifiesta que, el control de calidad es un componente crucial en la gestión de la producción, que debe aplicarse en tres etapas clave: las entradas materias primas, partes y suministros, el proceso de fabricación productos en proceso y las salidas productos terminados. El control de calidad es un proceso estructurado que verifica productos para detectar y descartar aquellos que no cumplen los estándares, empleando herramientas analíticas para evaluar y optimizar la calidad según criterios técnicos (Pacheco, 2021).

### **2.1.3. Control estadístico de calidad**

Es una disciplina clave que aplica técnicas estadísticas al Control de Calidad para mejorar productos y servicios, garantizando satisfacción y eficiencia. Este estudio abordará tres etapas esenciales: Inspección, Control Estadístico de Procesos CEP y Diseño Estadístico de Experimentos DEE, evaluando su aplicación y efecto en el rendimiento organizacional (Vives, 2010).

#### **2.1.3.1. Diagramas de control de calidad**

Los diagramas de control son herramientas fundamentales en el control estadístico de procesos, empleadas para supervisar la variabilidad y el rendimiento de un proceso a lo largo del tiempo. Según Consulting Group (SPC, 2013), permiten evaluar su estabilidad e identificar anomalías al distinguir entre variaciones normales y atípicas. Asimismo, facilitan la diferenciación de causas comunes y especiales de variación mediante la determinación de límites de control adecuados (Moya, 2020).

##### **2.1.3.1.1. Diagramas de control para medias de proceso $\bar{x}$**

Falcón Rojas (2006) indica, si la media  $\mu$  y la desviación estándar  $\sigma$  son conocidas entonces la gráfica  $\bar{x}$  es inmediata a partir de la definición:

Si  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  es una muestra de tamaño  $n$ , la media de la muestra, es:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}$$

$$LSC = \mu + 3 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$LC = \mu$$

$$LIC = \mu - 3 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Donde:

$LSC$  : Límite superior de control

*LC* : Limite central

*LIC* : Límite inferior de control

Si la media  $\mu$  y desviación estándar  $\sigma$  desconocidos es necesario estimarlos a partir de muestras preliminares, las cuales se obtienen cuando se establece que el proceso se encuentra en control. Estas estimaciones suelen realizarse utilizando al menos entre 20 y 25 muestras, si se recopilan un total de  $m$  muestras, y en cada muestra hay  $n$  observaciones, por lo general  $n$  sera pequeño (Montgomery, 2012). Sean  $\bar{x}_1, \bar{x}_1, \bar{x}_1, \dots, \bar{x}_m$  las medias de las muestras,  $\mu$  se obtiene promediando las medias muestrales o medias del proceso, es decir:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_1 + \bar{x}_1 + \dots + \bar{x}_m}{m} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{x}_i$$

Para establecer los límites de control, es necesario contar con un estimador de la desviación estándar, esta estimación puede realizarse utilizando las desviaciones estándar o las amplitudes de las  $m$  muestras (Montgomery, 2012). Si  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  es una muestra de tamaño  $n$ , la amplitud  $R$  se define como:

$$R = x_{m\acute{a}x} - x_{m\acute{i}n}$$

Montgomery (2012) indica que la variable aleatoria  $w = \frac{R}{\sigma}$  se llama amplitud relativa,

los parámetros de la distribución de  $w$ , que son funciones del tamaño de la muestra  $n$ , es decir, la media de  $E[w] = d_2$  y  $d_2$  es una constante conocida y tabulada que varía según el tamaño de la muestra. Sea  $R_1, R_2, R_3, \dots, R_m$  las amplitudes de las  $m$  muestras. La amplitud media es:

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_m}{m}, \text{ entonces, el estimador de } \sigma \text{ se calcula como } \sigma = \frac{\bar{R}}{d_2},$$

este estimador es insesgado de  $\sigma$  puesto que la esperanza de  $E[\sigma] = \sigma$ , con base en los

parámetros estimados, procedemos a establecer los límites de control superior e inferior de Shewhart.

$$LSC = \bar{\bar{x}} + 3 \frac{\bar{R}}{d_2 \sqrt{n}}$$

$$LC = \bar{\bar{x}}$$

$$LIC = \bar{\bar{x}} - 3 \frac{\bar{R}}{d_2 \sqrt{n}}$$

se puede notar que la cantidad  $A_2 = \frac{3}{d_2 \sqrt{n}}$  es una constante que depende únicamente del

tamaño de la muestra, entonces es posible volver a expresar los límites de control.

$$LSC = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R}$$

$$LC = \bar{\bar{x}}$$

$$LIC = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R}$$

#### 2.1.3.1.2. Diagramas de control para la variabilidad de proceso R

Si  $x$  es una característica de calidad cuantitativa de una población normal con parámetros conocidos  $\mu$  y  $\sigma$ , los parámetros de la distribución del rango relativo  $w$  dependen del tamaño de las observaciones  $n$ , que es conocido (Montgomery, 2012). De donde se tiene  $E[w] = d_2$  y  $\sqrt{\text{var}[w]} = d_3$ , donde  $d_2$  y  $d_3$  son constantes que dependen del tamaño de la muestra  $n$ .

$\mu_R = E[R] = E[w\sigma] = \sigma d_2$ , además, se tiene  $R = w\sigma$  la desviación estándar se

obtiene:

$$\sigma_R = \sqrt{\text{var}[R]} = \sqrt{\text{var}[w\sigma]} = \sigma \sqrt{\text{var}[w]}$$

$$\sigma_R = \sigma d_3$$

Por lo tanto, se obtienen los límites probabilísticos al nivel de  $\sigma$ , es:

$$LSC = \bar{R} + 3\sigma_R = \sigma d_2 + 3\sigma d_3$$

$$LSC = \bar{R} = \sigma d_2$$

$$LSC = \bar{R} - 3\sigma_R = \sigma d_2 - 3\sigma d_3$$

Montgomery (2012) indica que  $D_2 = (d_2 + 3d_3)$  y  $D_1 = (d_2 - 3d_3)$  son valores conocidos para distintos tamaños de la muestra. Entonces los límites de control para diagramas de rangos con parámetros dado, es:

$$LSC = D_2\sigma$$

$$LC = \bar{R} = \sigma d_2$$

$$LIC = D_1\sigma$$

Supongamos que la característica de calidad analizada  $X$  sigue una distribución normal con parámetros  $\mu$  y  $\sigma$ , ambos desconocidos; se utilizará el estimador  $\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2}$ .

$$LSC = \sigma d_2 + 3\sigma d_3 = \frac{\bar{R}}{d_2} d_2 + 3 \frac{\bar{R}}{d_2} d_3 = \left(1 + 3 \frac{d_3}{d_2}\right) \bar{R}$$

$$LC = \bar{R} = \sigma d_2$$

$$LSC = \sigma d_2 - 3\sigma d_3 = \frac{\bar{R}}{d_2} d_2 - 3 \frac{\bar{R}}{d_2} d_3 = \left(1 - 3 \frac{d_3}{d_2}\right) \bar{R}$$

donde se tiene  $D_4 = \left(1 + 3 \frac{d_3}{d_2}\right)$  y  $D_3 = \left(1 - 3 \frac{d_3}{d_2}\right)$  son valores totalmente conocido para

distintos tañamos de la muestra, entonces los límites del diagrama de control de rangos sin parámetro dado, es:

$$LSC = D_4 \bar{R}$$

$$LC = \bar{R}$$

$$LIC = D_3 \bar{R}$$

Los estudios de repetibilidad y reproducibilidad R&R el rango de muestra promedio o muestreo de aceptación de variable que se usa con mayor frecuencia es  $\sigma_i = \frac{\bar{R}}{d_2^*}$ , donde  $d_2^*$  representa una constante cuyo valor depende del tamaño de m y n (Patnaik 1950 como se cito en Reyes, 2019). Si  $d_2^*$  se emplea en situaciones donde se desea corregir la variabilidad observada para tener en cuenta la dispersión adicional en muestras pequeñas. Esto permite obtener una estimación más precisa de los límites de control. Según Patnaik (1950; como se citó en Reyes, 2019) por lo que,  $\frac{d_2^*}{\sqrt{v}}$  y donde  $v$  representa la fracción de los grados de libertad para la distribución  $x$ , esta aproximación está dada como:

$$d_2^* \cong d_2 \left( 1 + \frac{1}{4v} + \frac{1}{32v^2} + \frac{1}{128v^3} \right).$$

Woodall (2000; citado en Reyes, 2019) indica que no se requiere una aproximación para  $d_2^*$  por lo que  $d_2^* = \left( d_2 + \frac{v_n}{m} \right)^{1/2}$  donde  $v_n$  es la varianza del rango con el tamaño de muestra n de una población normal con varianza unitaria  $v_n = d_3^2$ .

### 2.1.3.2. Análisis de capacidad de procesos

Un proceso es una serie específica de actividades interrelacionadas que, realizadas en un orden particular, transforman entradas en salidas con valor añadido. Detalla el "cómo" se lleva a cabo una función o tarea específica dentro de un sistema, definiendo los pasos, recursos, roles y puntos de control necesarios para asegurar un resultado consistente y predecible.

Un análisis de capacidad evalúa la capacidad de un proceso para cumplir con requisitos específicos, asegurando que satisfaga las demandas del cliente de manera

consistente en la industria fabricante y de servicios (Montgomery, 2012). De acuerdo con Herrera & Fontalvo (2011) señalan que un proceso capaz cumple de forma consistentemente las especificaciones del diseño. El proceso es incapaz si  $6\sigma > LSE - LIE$  proceso controlado, pero fuera de especificaciones. También es indeseable si  $6\sigma = LSE - LIE$  cumple justo, sensible a variaciones. El caso ideal o capaz si  $6\sigma < LSE - LIE$  ocurre cuando la capacidad del proceso es menor que la diferencia entre los límites de especificación (p. 73).

Herrera & Fontalvo (2011) para medir los índices de capacidad, válido solo cuando el proceso es estable y tiene límites  $C_p$ , este índice mide la capacidad potencial del proceso con especificaciones, sin considerar su centrado.

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} = \frac{LSE - LIE}{6\left(\frac{\bar{R}}{d_2}\right)} = \frac{\text{Variación Tolerada}}{\text{Variación Real}}$$

Gutierrez & De la Vara (2009) muestra para que el proceso se considere potencialmente capaz se requiere que la tolerancia real siempre sea menor que la variación total (p.101).

$C_{pk}$ : Este índice mide la capacidad del proceso real o la eficacia del proceso, considerando tanto la variabilidad como el centrado del proceso en relación con los límites de especificación. Para tolerancias bilaterales, el valor de  $C_{pk}$  nunca será mayor que el de  $C_p$ , ya que  $C_{pk}$  tiene en cuenta el desvío del proceso respecto al centro de la tolerancia, mientras que  $C_p$  solo mide la habilidad sin considerar el desplazamiento General Motors Corporation (AIAG, 2010).

$$C_{pk} = \text{mínimo valor} \left\{ C_{pi} = \frac{\bar{\bar{x}} - LIE}{3\sigma}, C_{ps} = \frac{LSE - \bar{\bar{x}}}{3\sigma} \right\}$$

$$C_{P_k} = \text{mínimo valor} \left\{ C_{pi} = \frac{\bar{\bar{x}} - LIE}{3 \left( \frac{\bar{R}}{d_2} \right)}, C_{ps} = \frac{LSE - \bar{\bar{x}}}{3 \left( \frac{\bar{R}}{d_2} \right)} \right\}$$

Gutierrez & De la Vara (2009) indican que  $C_{pi}$  es índice de capacidad de un proceso para cumplir con las especificaciones inferior y  $C_{ps}$  índice de capacidad de un proceso para cumplir con la especificación superior (p.104).

El índice  $C_{P_k}$  es siempre menor o igual a  $C_p$ , lo que indica que el proceso está centrado si  $C_{P_k}$  es cercano a  $C_p$ , si valores de  $C_{P_k}$  iguales a cero o negativos indica que el medio del proceso está fuera de las especificaciones (Gutierrez & De la Vara, 2009).

$C_{P_m}$ : Es índice de Taguchi o rendimiento ajustado mide la capacidad del proceso considerando la desviación de la media respecto al valor objetivo  $N$ , lo que lo distingue de otros índices que solo miden la variabilidad, ya que también contempla el centrado del proceso (Montgomery, 2012). Taguchi sugiere medir la capacidad del proceso mediante un índice específico que él define como:

$$C_{P_m} = \frac{LSE - LIE}{6\tau}, \text{ donde } \tau (\text{tau}) \text{ está definida por:}$$

$$\tau = \sqrt{\sigma^2 + (\mu - N)^2}, \text{ entonces}$$

$$C_{P_m} = \frac{LSE - LIE}{6\sqrt{\sigma^2 + (\mu - N)^2}}, \text{ en términos de } C_p, \text{ es}$$

$$C_{P_m} = \frac{C_p}{\sqrt{1 + \left[ \frac{\mu - N}{\sigma} \right]^2}}, \text{ sí } \mu = N, \text{ entonces } C_{P_m} = C_p$$

$p_p$ : Este índice de desempeño potencial del proceso mide la capacidad potencial total de un proceso para cumplir con las especificaciones, considerando toda la variación observada, sin importar si el proceso está centrado ni si es estable (AIAG, 2010). También se

puede concluir el índice de desempeño potencias del proceso usa la desviación estándar a largo plazo y  $\sigma$  se estima mediante la desviación estándar de todos los datos  $\sigma = s$  (Gutierrez & De la Vara, 2009, p.107).

$$p_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma_p} = \frac{LSE - LIE}{6s}$$

$p_{pk}$  : Es un índice de desempeño real del proceso, evalúa el desempeño real del proceso respecto a los límites de especificación, considerando tanto la variación total como el descentrado de la media respecto a los límites.

$$p_{pk} = \text{mínimo valor} \left\{ \frac{LSE - \bar{x}}{3s}; \frac{\bar{x} - LIE}{3s} \right\}$$

El indica  $p_{pk}$  y  $p_p$  deben ser siempre evaluados y analizados conjuntamente, el valor de  $p_p$  significativamente es mayor que su correspondiente  $p_{pk}$  sugiere una oportunidad de mejora en el centrado del proceso (Herrera & Fontalvo, 2011).

#### **2.1.4 Sistemas de medición**

Un sistema es una red organizada de componentes interdependientes que interactúan entre sí para lograr un propósito común. Recibe entradas, las somete a una serie de procesos internos y genera salidas, operando dentro de un límite determinado y con una relación dinámica con su entorno. Su esencia radica en que el todo es más que la suma de sus partes aisladas.

Un sistema de medición es un conjunto de herramientas y procesos que permite obtener valores cuantitativos de una magnitud específica, destacándose por su precisión y exactitud para generar resultados confiables (Jiménez, 2019). La evaluación de los sistemas de medición implica analizar su capacidad y estabilidad mediante estudios de repetibilidad, reproducibilidad, linealidad y exactitud, a incluir todos los elementos involucrados como

operaciones, procedimientos, instrumentos, equipos, software y personal que asignan valores numéricos a las características evaluadas (Mejia & Alvarez, 2011).

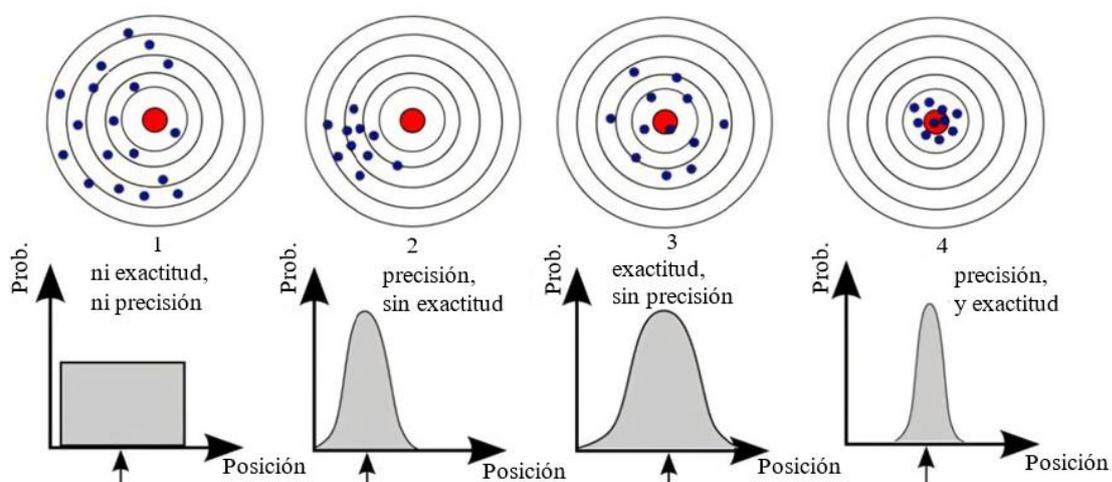
Un sistema de medición, que comprende instrumentos, métodos, software, personal y condiciones ambientales, es crucial para las empresas al evaluar el desempeño organizacional y guiar las decisiones, aunque opera con un margen de error. Además, la calibración, según la Norma Oficial peruana, establece la relación entre los valores indicados por un instrumento de medición y los estándares de referencia bajo condiciones específicas (General Motors Corporation AIAG, 2010).

La precisión se relaciona con la consistencia de las mediciones repetidas de una misma magnitud bajo condiciones idénticas, donde una alta precisión indica valores similares y refleja la confiabilidad de la medición, siendo un concepto fundamental en metrología para evaluar la calidad de los instrumentos de medición (Gómez, 2010).

La exactitud, o sesgo, evalúa la proximidad de las mediciones al valor real mediante la diferencia entre los medios de las mediciones observadas y el valor verdadero  $N$ , indicando si las mediciones son precisas al reflejar el resultado correcto, con el objetivo de minimizar esta diferencia para asegurar una representación precisa de la realidad (Gómez, 2010).

### Figura 1

*Precisión y exactitud de un sistema de medición.*



*Nota.* En el caso 1 se observa falta de precisión y exactitud, caso 2 se tiene buena precisión y falta de exactitud, caso 3 se tiene buena exactitud y falta de precisión y en el último buena precisión y buena exactitud, Prieto (2012).

#### **2.1.4.1. Variabilidad de un sistema de medición**

La variación en un sistema de medición se refiere a las diferencias en los resultados al medir el mismo objeto, influenciadas por la repetibilidad y reproducibilidad, estas variaciones son esencial para evaluar la precisión y exactitud, ya que permite identificar y descomponer las fuentes de variación, lo cual es fundamental para mejorar la calidad de las mediciones y aplicar correcciones cuando sea necesario (Montgomery, 2012). Métodos que se utilizaran en este estudio, análisis de varianza ANOVA, diagramas de control, análisis de capacidad de procesos, estudios de repetibilidad y reproducibilidad R&R y diseños experimentales DOE. Reyes (2019) indica las fuentes de variación en un sistema de medición se pueden clasificar en diferentes categorías que afectan su precisión y exactitud. Estas categorías varían según el sistema y el análisis realizado. Algunos aspectos comunes son:

**Operador:** Variación debido a diferentes operadores que realizan la medición.

**Equipo:** Variación debido a diferencias entre los equipos de medición.

**Parte:** Variación debido a diferencias entre las piezas o productos medidos.

**Material:** Variación debido a diferentes materiales utilizados en el proceso.

**Método:** Variación debido a diferentes métodos de medición.

**Ambiente:** Variación debido a condiciones ambientales (temperatura, humedad, etc.).

**Tiempo:** Variación a lo largo del tiempo.

#### **2.1.4.2. Errores de un sistema de medición**

Según Arreguín & Ávalos (s.f) reflejan errores en las mediciones por fallos en equipos, observación o ambiente, mostrando la desviación entre el valor medido y el real. Se dividen en sistemáticos y aleatorios, afectando la precisión según la aplicación. La capacidad

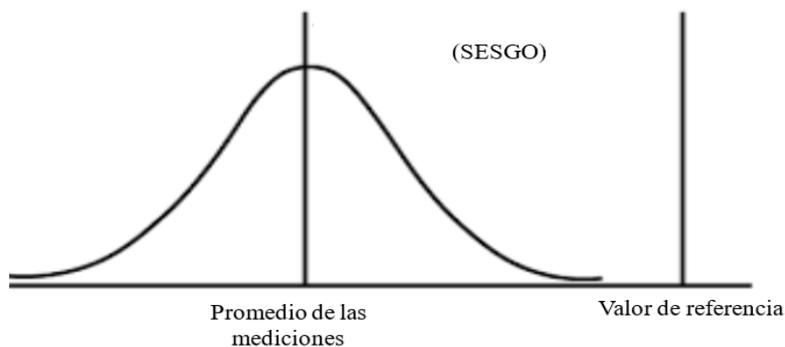
de un sistema de medición es su habilidad para asegurar precisión y coherencia a corto plazo, considerando errores aleatorios, divididos en exactitud y precisión (Reyes, 2019).

**a) La exactitud de un sistema de medición se compone de tres elementos.**

El sesgo en un sistema de medición es la diferencia sistemática entre los valores medidos y los verdaderos. Identificar y corregir este sesgo es crucial para mejorar la precisión, comparando el promedio de las mediciones con un valor de referencia o, en su ausencia, con un rango medio del proceso (Escalante, 2013).

**Figura 2**

*Componente de sesgo del sistema de medición*

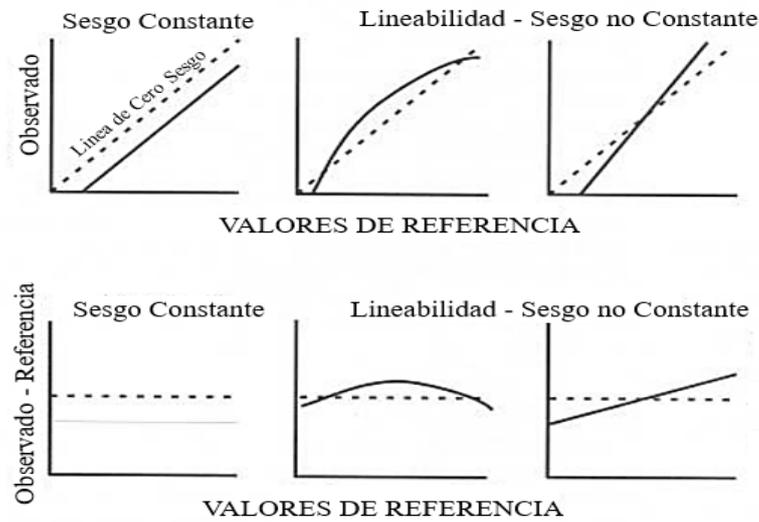


*Nota.* La figura muestra que el sesgo es una desviación sistemática del sistema de medición respecto al valor verdadero, Consulting Grup (SPC, 2017)

La linealidad evalúa cómo el tamaño de la parte afecta el sesgo del sistema de medición, comprobando si este varía proporcionalmente en el rango de mediciones y es fundamental para garantizar que el sistema mantenga una relación lineal y precisa con las dimensiones medidas (Escalante, 2013).

### Figura 3

#### Componente de linealidad del sistema de medición

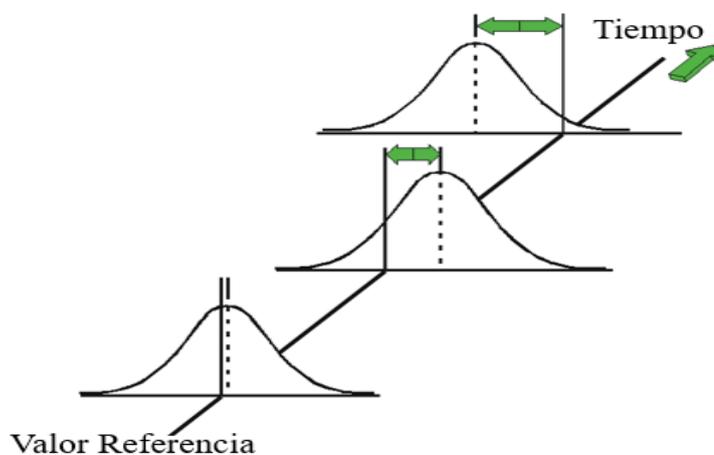


*Nota.* La figura proporciona una representación visual clara de cómo la linealidad y el sesgo afectan los resultados de un sistema de medición, General Motors Corporation (AIAG, 2010)

La estabilidad evalúa la capacidad del sistema de medición para mantener la precisión y exactitud con el tiempo, midiendo la variación del sesgo al medir repetidamente una pieza de referencia bajo diferentes condiciones (Vázquez, 2013, p. 93).

### Figura 4

#### Componente de estabilidad



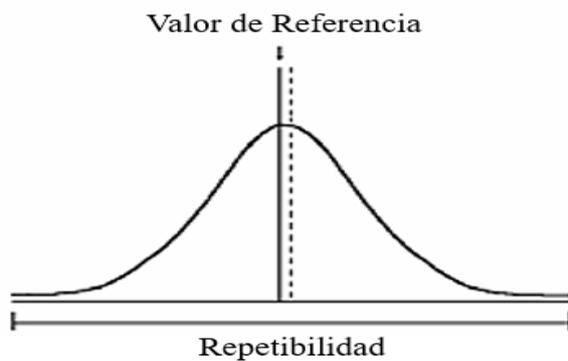
*Nota.* La figura ilustra cómo el sesgo afecta la precisión y confiabilidad de las mediciones. Fuente de General Motors Corporation (AIAG, 2010)

**b) La precisión, o variación en la medición, tiene dos componentes:**

Gutiérrez & De la Vará (2009) manifiestan que la repetibilidad evalúa la variación en las mediciones realizadas por el mismo operador con el mismo dispositivo en condiciones idénticas, centrándose en la precisión del instrumento al medir el mismo objeto (p.283)

**Figura 5**

*Componente de repetibilidad en el sistema de medición.*

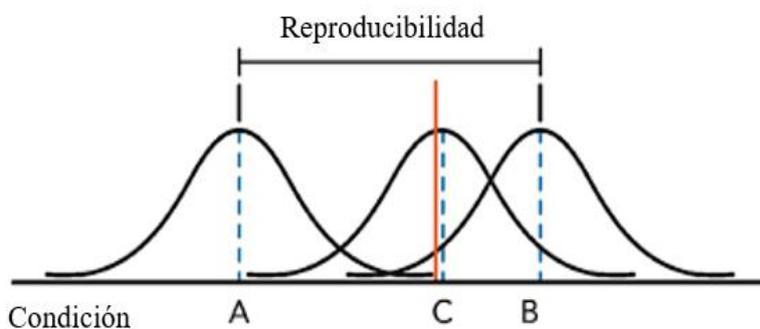


*Nota.* La figura muestra la distribución normal de las mediciones obtenidas al repetir múltiples veces la misma medición bajo condiciones controladas, General Motors Corporation (AIAG, 2010)

Gutiérrez & De la Vará (2009) indican que “la reproducibilidad evalúa la variación en las mediciones cuando diferentes operadores utilizan el mismo dispositivo para medir la misma parte. Refleja la consistencia y precisión de los resultados, independientemente de quién realice la medición (p. 284).

**Figura 6**

*Componente de reproducibilidad de sistema de medición*



*Nota:* La figura ilustra el concepto de reproducibilidad en un sistema de medición, comparando los resultados obtenidos bajo diferentes condiciones (A, B y C), (Llamosa, et al. 2007).

### 2.1.4.3. Proporciones de un sistema de medición

#### 2.1.4.3.1. Precisión tolerancia ( $P/T$ )

Gutiérrez & De la Vará (2009) la precisión se refiere a la consistencia de las mediciones, mientras que la tolerancia define el rango de variación aceptable sin comprometer la calidad del producto, este índice se expresa como un porcentaje que relaciona el error de medición  $EM$  con la variabilidad permitida. Es esencial que el error de medición sea inferior a la tolerancia para que el sistema identifique correctamente las piezas, subrayando que la precisión del instrumento depende de la calidad a medir.

De acuerdo a Reyes (2019) indica el valor que se está midiendo está dado por  $Y$ , los errores de medición por  $E$ . por lo tanto, si  $X = Y + E$ . Estas cantidades se consideran como variables, entonces la variación de las medidas del producto  $X$  se considera como:

$$Var(X) = Var(Y) + Var(E)$$

Donde:

$Var(Y)$ : variación de los valores del producto

$Var(E)$ : variación de errores de medición

Entonces la relación  $P/T$ , es:

$$P/T = \left( \frac{EM}{LES - LEI} \right) \times 100\% = \frac{6SD(E)}{LES - LEI} = \frac{6\sigma_{R\&R}}{LES - LEI}$$

El índice  $P/T$  se interpreta de la siguiente manera: un  $P/T \leq 10\%$  indica un proceso de medición excelente; entre 10% y 20%, es considerado bueno; entre 20% y 30%, es marginal o casi inaceptable; y un  $P/T \geq 30\%$  es inaceptable y requiere corrección (Gutiérrez & De la Vará, 2009).

### 2.1.4.3.2. Precisión a la tolerancia total (P/TV)

Reyes (2019) indica evaluar la calidad de un proceso o sistema de medición es comparar la magnitud del error de medición expandida (EM) con la variación total observada (p. 15).

$$P/TV = \left( \frac{EM}{Var.Tol} \right) \times 100\% = \frac{\sigma_{R\&R}}{\sigma_{total}} \times 100\%$$

Donde:

$EM$  : Variación del sistema

$Var.Total = \sigma_{total}$  = Variación del producto + variación del sistema.

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{total}^2 + \sigma_{R\&R}^2}$$

### 2.1.4.3.3. Coeficiente de correlación intraclase $ICC = \rho$

De acuerdo con Estudios de Posgrado en Metodología de la investigación en Ciencia de la Salud (2014), el coeficiente de correlación ICC permite medir la concordancia entre dos o más valores cuantitativos obtenidos con diferentes instrumentos de medida o evaluadores (pág. 8). También el coeficiente de correlación intraclase se utiliza para determinar cuán similares son las mediciones dentro de los mismos grupos en comparación con las mediciones entre diferentes grupos. Esto es especialmente útil en estudios donde se evalúa el mismo objeto o sujeto por diferentes evaluadores o bajo diferentes condiciones.

De acuerdo con Reyes (2019) el  $ICC$  es la medida de asociación utilizada para caracterizar la utilidad de un sistema de medición y calcula como la proporción de la varianza total que es atribuible a la varianza del grupo (p. 15).

$$ICC = \frac{\sigma_P^2}{\sigma_{total}^2} = \frac{\sigma_P^2}{\sigma_P^2 + \sigma_O^2 + \sigma_{OP}^2 + \sigma_E^2}$$

donde:

$\sigma_{total}^2$ : varianza total

$\sigma_p^2$ : varianza del producto /parte

$\sigma_O^2$ : varianza del operador

$\sigma_{OP}^2$ : varianza de la interrelación de parte operador (reproducibilidad)

$\sigma_E^2$ : varianza del equipo (repetibilidad)

la correlación intraclase, es:

$$ICC = \rho = 1 - \frac{\sigma_{R\&R}}{\sigma_{total}}$$

Martínez & Pérez (2022) al aplicar el método se pueden obtener valores comprendidos de  $ICC$  entre 0 y 1, donde 0 significa ausencia de concordancia o baja consistencia y si  $ICC$  es cercano a 1 indica alta confiabilidad o consistencia (p. 2).

#### **2.1.4.3.4. Número de categoría distintas $ndc$**

General Motors Corporation (AIAG, 2010),  $ndc$  es el número de categorías distintas representa cuántas categorías puede distinguir de manera confiable un sistema de medición, es una medida basada en el número de intervalos de confianza al 97% que se utilizan para estimar la variación entre las partes. Un valor de 5 o más es ideal, ya que indica un mayor nivel de precisión en la diferenciación de las categorías. Para Gutiérrez & De la Vará (2009), el  $ndc$  representa la cantidad de intervalos de confianza al 97%, sin superposición, dentro de la variación de las partes, indica cuántos grupos de piezas el sistema puede distinguir, reflejando su resolución para medir la característica de interés, se calcula de la siguiente manera:

$$ndc = \sqrt{2} \left( \frac{\sigma_P}{\sigma_{R\&R}} \right)$$

Según Gutiérrez & De la Vará (2009) manifiestan el número de grupos diferentes de piezas que el sistema de medición es capaz de distinguir (p. 293).

$$ndc = 1.41 \left( \frac{\sigma_P}{\sigma_{R\&R}} \right) = 1.41 \frac{\sqrt{\sigma_{total}^2 - \sigma_{R\&R}^2}}{\sigma_{R\&R}}$$

La calidad del sistema de medición se interpreta según el valor de  $ndc$  como:

Si  $ndc > 4$  la resolución del sistema es adecuada, si  $ndc < 4$  la resolución es claramente inadecuada y si  $2 \leq ndc \leq 4$  la resolución es poco adecuada (General Motors Corporation AIAG, 2010).

#### 2.1.4.4. Impacto del R&R sobre el índice de capacidad potencial $C_p$

Según Carrión et al. (2021) los índices de capacidad se basan en mediciones de un sistema, por lo que dependen de la precisión de dichas mediciones. Los índices de capacidad incluyen la desviación estándar del proceso, denotada como  $\sigma$ , que se calcula a partir de las mediciones y corresponde a la variación total observada  $TV$  (Carrión et al., 2021).

$$C_p = \frac{LES - LEI}{6\sigma_{total}} = \frac{LES - LEI}{6\sqrt{\sigma_P^2 + \sigma_{R\&R}^2}}$$

si invertimos él  $C_p$  y levamos al cuadrado, se obtiene:

$$\left( \frac{1}{C_p^2} \right) = \frac{36(\sigma_P^2 + \sigma_{R\&R}^2)}{(LES - LEI)^2} = \frac{36\sigma_P^2}{(LES - LEI)^2} + \frac{36\sigma_{R\&R}^2}{(LES - LEI)^2}$$

reemplazamos a cada término de la suma:

$$\left( \frac{1}{C_{Pp}^2} \right) = \frac{36 \times \sigma_P^2}{(LES - LEI)^2}$$

$$\left( \frac{1}{C_{Psm}^2} \right) = \frac{36 \times \sigma_{R\&R}^2}{(LES - LEI)^2}$$

reemplazando la inversa al cuadrado de  $C_p$  resulta entonces que:

$$\frac{1}{C_P^2} = \frac{1}{C_{Pp}^2} + \frac{1}{C_{Psm}^2} = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{C_{Pp}^2} + \frac{1}{C_{Psm}^2}}}$$

El índice de capacidad  $C_p$  puede considerarse como la capacidad potencial observada y  $C_{Pp}$  es la capacidad real, es decir la que tendríamos si dispusiéramos de un sistema de medida libre de error o incertidumbre. Y  $C_{Psm}^2$  es la capacidad del sistema de medida, y está ligada a la repetibilidad y reproducibilidad del sistema de medida (Carrión et al., 2021).

En la práctica, esto implica que la capacidad observada será siempre inferior a la capacidad real debido a la incertidumbre del sistema de medición. La magnitud de esta diferencia varía según el rendimiento del sistema de medición.

El porcentaje de error entre ambas capacidades potenciales puede relacionarse con los valores de  $\% \sigma_{R\&R}$ . Estos errores  $E\%$ , se obtiene:

$$E\% = \left( \frac{C_{Pp} - C_P}{C_{Pp}} \right) \times 100 = \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{\% \sigma_{R\&R}}{100} \right)^2} \right) \times 100$$

El porcentaje de error entre las capacidades potenciales observadas y reales depende únicamente del valor de  $\% \sigma_{R\&R}$ . podemos resaltar que:

- Cuando  $\sigma_{R\&R} \leq 10\%$ , el porcentaje de error  $E \leq 0.5\%$  excelente sistema de medición.
- Cuando  $10\% < \sigma_{R\&R} < 30\%$ , el porcentaje de error entre  $0.5\% < E < 4.6\%$  aceptable con reservas; se sugiere mejora.
- Cuando  $\sigma_{R\&R} \geq 30\%$ , el porcentaje de error  $E \geq 4.6\%$  no aceptable; requiere acciones correctivas.

### **2.1.5. Diseño de Experimentos (DOE)**

Los diseños experimentales en control de calidad permiten identificar y reducir la variabilidad en las mediciones, garantizando resultados consistentes y confiables para mantener estándares de calidad (Correa & Burgos, 2007). De acuerdo a (Reinoso, 2016), para optimizar un experimento, se debe crear un diseño que incluya de 2 a 5 factores críticos que más influyen en la respuesta. El objetivo es ajustar estos factores para alcanzar una respuesta deseada, como un valor máximo, mínimo o un rango específico.

#### **2.1.5.1. Metodología a emplear para el diseño de experimentos**

a) El investigador elige las variables o factores independientes que se analizarán, basándose en su comprensión del fenómeno y en la capacidad de controlar dichos factores (Fernández, 2020). Estos factores deben ser controlables y contar con sistemas de medición adecuados para establecer valores específicos de manera confiable en el experimento (Reinoso, 2016).

Los factores analizados en un experimento son las variables que se investigan para determinar su influencia sobre la variable de respuesta (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

b) En un diseño experimental, los valores asignados a cada factor se llaman niveles, y su combinación para todos los factores estudiados da lugar al tratamiento o punto de diseño (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

#### **2.1.5.2. Determinación del modelo estadístico**

Para seleccionar el modelo óptimo según las necesidades experimentales, especialmente en la variación por repetibilidad y reproducibilidad, se deben considerar al menos dos factores controlables en condiciones establecidas (Correa & Burgos, 2007).

##### **2.1.5.2.1. Diseño de experimentos con modelos mixtos con dos factores**

Según este modelo, se combinan factores fijos y aleatorios, con el factor A como fijo y el factor B como aleatorio. Montgomery (2012) este enfoque se conoce como análisis de varianza de un modelo mixto, cuyo modelo matemático es el siguiente:

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}, \quad \begin{cases} i=1, 2, 3, \dots, a \\ j=1, 2, 3, \dots, b \\ k=1, 2, 3, \dots, n \end{cases}$$

Donde:

$y_{ijk}$ : Respuesta observada

$\mu$ : Media general

$\alpha_i$ : Efecto del factor fijo A,  $i=1, 2, 3, \dots, a$

$\beta_j$ : Efecto del factor aleatorio B asumiendo  $N(0, \sigma_B^2)$

$(\alpha\beta)_{ij}$ : Efecto de interacción aleatoria entre A y B asumiendo  $N(0, \sigma_{AB}^2)$

$\varepsilon_{ijk}$ : Error experimental  $N(0, \sigma)$

### Formulación de hipótesis

Factor fijo A:

$$H_0: \alpha_i = 0 \quad \text{versus} \quad H_a: \alpha_i \neq 0$$

Factor aleatorio:

$$H_0: \sigma_B^2 = 0 \quad \text{versus} \quad H_a: \sigma_B^2 > 0$$

Interacción AB

$$H_0: \sigma_{AB}^2 = 0 \quad \text{versus} \quad H_a: \sigma_{AB}^2 > 0$$

La suma de cuadrados se termina por:

$$\text{Suma de cuadrado total: } SS_{total} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

Suma de cuadrados de los efectos principales:

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i..}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_{.j}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$\text{Suma de cuadrado de la interacción: } SS_{AB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$\text{Suma de cuadrados de los errores: } SS_E = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B$$

**Tabla 1:**

ANOVA de dos factores mixtos.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F – estadístico
A (Fijo)	$SS_A$	$a-1$	$MS_A = \frac{SC_A}{a-1}$	$\frac{MS_A}{MS_{AB}}$
B (aleato.)	$SS_B$	$b-1$	$MS_B = \frac{SC_B}{b-1}$	$\frac{MS_B}{MS_E}$
Interacción AB	$SS_{AB}$	$(a-1)(b-1)$	$MS_{AB} = \frac{SC_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	$SS_E$	$abc(n-1)$	$MC_E = \frac{SC_E}{ab(n-1)}$	
Total	$SCT$	$abn-1$		

*Nota:* Esta tabla analiza cómo diferentes factores como el operario que realiza la medición o la pieza que se está midiendo influyen en la precisión de un instrumento de medición. Tomado de Reyes (2019).

**Esperanzas de los cuadrados medios de dos factores mixtos, es:**

$$E[MS_A] = \sigma^2 + n\sigma_{AB}^2 + \frac{bn \sum_{i=1}^a \alpha_i^2}{a-1}$$

$$E[MS_B] = \sigma^2 + an\sigma_B^2$$

$$E[MS_{AB}] = \sigma^2 + n\sigma_{AB}^2$$

$$E[MS_E] = \sigma^2$$

Montgomery (2004) para los modelos mixtos es posible estimar los efectos del factor fijos y las componentes de varianza se estiman a partir del método de análisis de varianza, esto es:

$$\mu = \bar{y}_{...}$$

$$\alpha_i = \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...}, i = 1, 2, 3, \dots, a$$

$$\text{Varianza del factor aleatorio (B): } \sigma_B^2 = \frac{MC_B - MC_E}{an}$$

$$\text{Varianza de la interacción } AB : \sigma_{AB}^2 = \frac{MC_{AB} - MC_E}{n}$$

$$\text{Varianza del error: } \sigma^2 = MC_E$$

#### **2.1.5.2.2. Diseño de factores con modelos Mixtos con tres factores**

Los factores mixtos aparecen en un experimento cuando se combinan factores fijos y aleatorios, donde la interacción entre ambos se considera aleatoria (Restrepo, 2007). En un diseño factorial mixto con tres factores A, B y C, donde los factores A y B son fijos, mientras que el factor C es aleatorio, con n réplicas. (Montgomery, 2012) representa modelo lineal matemático por:

$$y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \tau_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\tau\beta)_{jk} + (\alpha\tau)_{ik} + (\alpha\beta\tau)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}, \begin{cases} i = 1, 2, 3, \dots, a \\ j = 1, 2, 3, \dots, b \\ k = 1, 2, 3, \dots, c \\ l = 1, 2, 3, \dots, n \end{cases}$$

donde:

$Y_{ijkl}$  : Respuesta observada

$\mu$  : Media general

$\alpha_i$  : Efecto del factor fijo A,  $i = 1, 2, 3, \dots, a$

$\beta_j$  : Efecto del factor fijo B,  $j = 1, 2, 3, \dots, b$

$\tau_k$ : Efecto del factor aleatorio C,  $k=1, 2, 3, \dots, c$  asumiendo una distribución  $N[0, \sigma_C^2]$

$(\alpha\beta)_{ij}$ : Interacción entre A y B

$(\alpha\tau)_{ik}$ : Interacción entre A y C

$(\tau\beta)_{jk}$ : Interacción entre B y C

$(\alpha\beta\tau)_{ijk}$ : Interacción triple

$\varepsilon_{ijkl}$ : Error experimental  $N(0, \sigma)$

Prueba de hipótesis

**Tabla 2:**

*Prueba de hipótesis de tres factores mixtos fijos y aleatorios.*

Efecto	Hipótesis nula $H_0$	Hipótesis nula $H_1$
Factor fijo A	$\alpha_i = 0$ , para todos $i$	$\alpha_i \neq 0$ para al menos un $i$
Factor fijo B	$\beta_j = 0$ , para todos $j$	$\beta_j \neq 0$ para al menos un $j$
Factor aleatorio C	$\sigma_C = 0$	$\sigma_C > 0$
Interacción $AB$	$(\alpha\beta)_{ij} = 0$	$(\alpha\beta)_{ij} \neq 0$
Interacción $AC$	$\sigma_{AC} = 0$	$\sigma_{AC} > 0$
Interacción $BC$	$\sigma_{BC} = 0$	$\sigma_{BC} > 0$
Interacción $ABC$	$\sigma_{ABC} = 0$	$\sigma_{ABC} > 0$

*Nota.* La tabla muestra la prueba de hipótesis de factores mixtos.

Suma de cuadrados de los factores (SC)

$$SC_{total} = SC_A + SC_B + SC_C + SC_{AB} + SC_{AC} + SC_{BC} + SC_{ABC} + SC_E$$

- Suma de cuadrados totales:  $SC_{total} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn}$
- Suma de cuadros del factor fijo A:  $SC_A = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a y_{i\dots}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn}$

- Suma de cuadros del factor fijo B:  $SC_B = \frac{1}{acn} \sum_{j=1}^b y_{.j..}^2 - \frac{y_{....}^2}{abcn}$

- Suma de cuadros del factor fijo C:  $SC_C = \frac{1}{abn} \sum_{k=1}^c y_{...k}^2 - \frac{y_{....}^2}{abcn}$

- Suma de cuadrados de la interacción AB, AC y BC

$$SC_{AB} = \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij..}^2 - \frac{y_{....}^2}{abcn} - SC_A - SC_B$$

$$SC_{AC} = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c y_{i.k.}^2 - \frac{y_{....}^2}{abcn} - SC_A - SC_C$$

$$SC_{BC} = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{.jk.}^2 - \frac{y_{....}^2}{abcn} - SC_B - SC_C$$

- Suma de cuadrado de la interacción de los tres factores ABC

$$SC_{ABC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{ijk.}^2 - \frac{y_{....}^2}{abcn} - SC_A - SC_B - SC_C - SC_{AB} - SC_{AC} - SC_{BC}$$

- Suma de cuadrado de errores

$$SC_E = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n (y_{ijkl} - \bar{y}_{ijk.})^2$$

**Tabla 3:***ANOVA de tres factores mixtos.*

<b>Fuente de variación</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrados medios</b>	<b>F – estadístico</b>
A (Fijo)	$SC_A$	$a - 1$	$MS_A = \frac{SC_A}{a - 1}$	$\frac{MS_A}{MS_{AC}}$
B (Fijo)	$SC_B$	$b - 1$	$MS_B = \frac{SC_B}{b - 1}$	$\frac{MS_B}{MS_{BC}}$
C (Aleatori)	$SC_C$	$c - 1$	$MS_C = \frac{SC_C}{c - 1}$	
Inte. $AB$	$SC_{AB}$	$(a-1)(b-1)$	$MS_{AB} = \frac{SC_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_{ABC}}$
Inte. $AC$	$SC_{AC}$	$(a-1)(b-1)$	$MS_{AC} = \frac{SC_{AC}}{(a-1)(c-1)}$	$\frac{MS_{AC}}{MC_E}$
Inte. $BC$	$SC_{BC}$	$(b-1)(c-1)$	$MS_{BC} = \frac{SC_{BC}}{(b-1)(c-1)}$	$\frac{MC_{BC}}{MC_E}$
Inte. $ABC$	$SC_{ABC}$	$(a-1)(b-1)(c-1)$	$MS_{ABC} = \frac{SC_{ABC}}{(a-1)(b-1)(c-1)}$	$\frac{MS_{ABC}}{MC_E}$
Error	$SC_E$	$abc(n-1)$	$MC_E = \frac{SC_E}{abc(n-1)}$	
Total	$SCT$	$abcn - 1$		

### Esperanza de cuadrados medios $E[MS]$

**Tabla 4:**

*Esperanza de los cuadrados medios de los tres factores mixtos.*

Fuente de variación	Esperanza matemática $E[MS]$
Factor A (Fijo)	$E[MS_A] = \sigma^2 + cn\sigma_{AC}^2 + n\sigma_{ABC}^2 + \frac{bcn \sum_{i=1}^a \alpha_i^2}{a-1}$
Factor B (Fijo)	$E[MS_B] = \sigma^2 + cn\sigma_{BC}^2 + n\sigma_{ABC}^2 + \frac{acn \sum_{j=1}^b \beta_j^2}{b-1}$
Factor C (aleatorio)	$E[MS_C] = \sigma^2 + n\sigma_{AC}^2 + n\sigma_{BC}^2 + n\sigma_{ABC}^2 + abn\sigma_C^2$
Factor interacción AB	$E[MS_{AB}] = \sigma^2 + cn\sigma_{ABC}^2 + \frac{cn \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\alpha\beta)_{ij}^2}{(a-1)(b-1)}$
Factor interacción AC	$E[MS_{AC}] = \sigma^2 + n\sigma_{ABC}^2 + bn\sigma_{AC}^2$
Factor interacción BC	$E[MS_{BC}] = \sigma^2 + n\sigma_{ABC}^2 + an\sigma_{BC}^2$
Factor interacción ABC	$E[MS_{ABC}] = \sigma^2 + n\sigma_{ABC}^2$
Error (residual)	$E[MS_E] = \sigma^2$

*Nota.* La tabla muestra la derivación de los cuadrados medios, modelo de efectos fijos y aleatorios (Montgomery, 2004).

Determinamos varianza de los factores fijos y aleatorios en ANOVA, es:

**Factores fijos:** No poseen una varianza poblacional definida, ya que sus niveles son elegidos deliberadamente por el investigador.

**Factores aleatorios:** Se asumen como una representación de una población más amplia de niveles posibles, por lo que su impacto se evalúa a través de la varianza en vez de las medias.

$$\text{Varianza del factor aleatorio (C): } \sigma_C^2 = \frac{MC_C - MC_{AC} - MC_{BC} + MC_{ABC}}{abn}$$

$$\text{Varianza de la interacción AC: } \sigma_{AC}^2 = \frac{MC_{AC} - MC_{ABC}}{bn}$$

Varianza de la interacción  $BC$ : 
$$\sigma_{BC}^2 = \frac{MC_{BC} - MC_{ABC}}{an}$$

Varianza de la interacción  $ABC$ : 
$$\sigma_{ABC}^2 = \frac{MC_{ABC} - MC_E}{n}$$

Varianza del error: 
$$\sigma_E^2 = MS_E$$

### 2.1.5.2.3. Supuestos del modelo

Cumplir con los supuestos estadísticos asegura la validez del análisis, previniendo conclusiones erróneas incluso con modelos avanzados. Según Gutiérrez & De la Vara (2008) señala, la confiabilidad de los resultados en un análisis de varianza depende del cumplimiento de ciertos supuestos fundamentales del modelo. Estos incluyen la normalidad de la distribución de los datos, la homogeneidad de variaciones entre los tratamientos y la independencia de las observaciones (p. 81).

Es fundamental tener en cuenta las siguientes hipótesis:

a) **Normalidad de los residuos:** Facilita la verificación visual del ajuste de los datos a una distribución específica. Si los datos siguen una distribución normal, sus residuos también deberían hacerlo. Para evaluar este supuesto, se emplea la prueba de Kolmogorov-Smirnov y herramientas gráficas como histogramas y gráficos Q-Q plot.

b) **Varianza constante (Homocedasticidad):** Para verificar la igualdad de varianzas entre grupos, se grafica los valores predichos  $Y_{ij}$  eje horizontal contra los residuos  $\varepsilon_{ij}$  eje vertical; si los puntos se distribuyen aleatoriamente en una banda horizontal, se cumple la homocedasticidad varianzas iguales, mientras que un patrón definido, como un embudo, indica heterocedasticidad varianzas diferentes (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

Supongamos se tiene a tratamientos independientes con  $N(\mu_i, \sigma_i^2)$ ,  $i=1, 2, 3, \dots, a$ , donde varianzas son desconocidas. Se quiere probar varianzas iguales.

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \dots = \sigma_a^2 = \sigma^2$$

$$H_a : \sigma_i^2 \neq \sigma_j^2 \text{ para } i \neq j$$

Si el p-valor es mayor a nivel de significación  $\alpha = 0.05$  no rechazamos la hipótesis nula.

**c) Independencia:** Montgomery (2004) analiza la secuencia de residuos revela correlacione, lo que destaca la importancia de una aleatorización experimental adecuada para asegurar la independencia de los datos (p. 79).

#### *2.1.5.2.4. Comparaciones o pruebas de rango múltiples*

Gutiérrez & De la Vara (2008) una vez que un ANOVA rechaza la hipótesis nula, el siguiente paso crucial es identificar qué tratamientos específicos difieren significativamente entre sí. Montgomery (2004) concidera el escenario donde el objetivo es contrastar cada posible combinación de medias de los tratamientos, y las hipótesis que buscamos evaluar son  $H_0 : \mu_i = \mu_j$  para todo  $i \neq j$  (p. 96).

Según Gutiérrez & De la Vara (2008), la prueba de Tukey compara todas las diferencias entre las medias de las muestras analizadas utilizando un único estadístico de prueba y un valor crítico específico.

$$T_\alpha = q_\alpha(k, N - K) \sqrt{\frac{CM_E}{n_i}}$$

donde  $CM_E$  representa el cuadrado medio del error,  $n_i$  el número de observaciones por tratamiento,  $k$  la cantidad de tratamientos, y  $N - k$  los grados de libertad del error, el valor  $\alpha$  es el nivel de significancia predefinido, y  $q_\alpha(k, N - k)$  corresponde a los puntos porcentuales de la distribución del rango estudentizado. Las medias de dos tratamientos se consideran significativamente distintas si la diferencia absoluta entre sus medias muestrales es mayor que el valor  $T_\alpha$  (p. 76).

### 2.1.6. Métodos estadísticos para el análisis de Repetibilidad y Reproducibilidad

Para analizar la repetibilidad y reproducibilidad en los sistemas de medición para bolsas de sal de Maras, se pueden usar métodos estadísticos que cuantifican la variabilidad y evalúan la consistencia. Según General Motors Corporation (AIAG, 2010) en su manual de análisis de sistemas de medición, se indica que el estudio de calibres de variables puede realizarse mediante diversas técnicas, y en este manual se han adoptado tres métodos específicos.

#### 2.1.6.1. Método de los promedios y rangos

Llamosa et al. (2007), el método de promedios y rangos es eficaz para evaluar la repetibilidad y reproducibilidad de un sistema de medición, descomponiendo la variabilidad en estos dos componentes. A continuación, se presentan los pasos para su implementación:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{producto}^2 + \sigma_{operador}^2 + \sigma_{instrumento}^2$$

donde:

$\sigma_{total}^2$  : Representa la variación total del sistema

$\sigma_{producto}^2$  : Representa la variabilidad al producto (partes o piezas)

$\sigma_{operador}^2$  : Representa la variabilidad a los operarios

$\sigma_{instrumento}^2$  : Representa la variabilidad del instrumento de medición

El cálculo de la variabilidad del instrumento de medición y de los operarios es:

$$\sigma_{instrumento}^2 = \sigma_{repetibilidad}^2 \quad \text{y} \quad \sigma_{operador}^2 = \sigma_{reproducibilidad}^2$$

por lo tanto, la variación del sistema de medición será:

$$\sigma_{R\&R}^2 = \sigma_{repetibilidad}^2 + \sigma_{reproducibilidad}^2$$

Cada operador realiza las pruebas asignadas y anota los resultados y calculamos para cada operador el rango  $R$ , este resultado se obtiene entre el dato mayor  $x_{ijk_{m\acute{a}x}}$  y el dato menor  $x_{ijk_{m\acute{i}n}}$  de las mediciones que se hace en cada pieza o parte entre las  $r$  réplicas de los experimentos de cada operador (Ordorica et al., 2011).

$$R = x_{ijk_{m\acute{a}x}} - x_{ijk_{m\acute{i}n}}$$

Para calcular el promedio de rangos  $\bar{R}$  de cada operador, es:

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^o R_{ij}}{po}, \quad 1 \leq i \leq p \wedge 1 \leq j \leq o$$

Donde este método se basa en “ $r$ ” número de replicas, “ $o$ ” número de operadores y “ $p$ ” número de partes. Después, se calcula los promedios de sus rangos  $\bar{R}$  para cada operador

$$\bar{\bar{R}} = \frac{\sum_{j=1}^o \bar{R}}{o}$$

la variación producida durante las réplicas de medición debido a los equipos se denomina variación del equipo EV.

Reyes (2019) indica la repetibilidad o variación del equipo EV se determina multiplicando el promedio del rango  $\bar{\bar{R}}$  por una constante  $k_1$  (p. 30).

$$EV = \bar{\bar{R}} k_1$$

Portuondo & J.Portuondo (2010) indican que  $k_1$  es una constante que depende del número de mediciones realizadas por cada operador y proporciona un intervalo de confianza del 99 % para estas características (p. 119).

$$EV = \bar{\bar{R}} k_1 = 5.15 \sigma_{repetibilidad}$$

Donde:

$\bar{R}$  : rango de promedios

$$k_1 = 1/d_2$$

Gutiérrez & De la Vará (2009) la reproducibilidad o variación del operario  $OV$  o  $\sigma_o$  se determina de la siguiente manera:

$$OV = \sqrt{(k_2 \bar{x}_{difer})^2 - \frac{(EV)^2}{pr}} = 5.14 \sigma_{repetibilidad}$$

Portuondo & Portuondo (2010) indica  $k_2$  es una constante que depende del número de operadores y proporciona un intervalo de confianza del 99 % para estas características (p. 119).

Donde:

$\bar{x}_{difer}$  : máxima diferencia promedia entre los operarios

$k_2$  depende el número de operadores, además la constante  $k_2 = \frac{5.15}{d_2^*}$ , donde  $d_2^*$  es una

corrección de la constante  $d_2$  usados en las cartas de control (Gutiérrez & De la Vará, 2009).

**Tabla 5:**

Valores de las constante  $k_1$  y  $k_2$

Número de mediciones	2	3	4	5
$k_1$	5.59	3.05	2.50	2.21
Número de operadores	2	3	4	5
$k_2$	3.65	2.70	2.30	2.80

Nota. La tabla muestra los valores de las constantes  $k_1$  y  $k_2$  para determinar la variación de repetibilidad y reproducibilidad de los sistemas de medición (Y. Portuondo & J. Portuondo, 2010)

Gutiérrez & De la Vará (2009) la variación del sistema de medición para la repetibilidad y reproducibilidad  $\sigma_{R\&R}$  se determina sumando los cuadrados de la variación del equipo y la variación de los operadores y luego extrayendo la raíz cuadrada (p. 288).

$$\sigma_{R\&R} = \sqrt{(EV)^2 + (OV)^2}$$

Reyes (2019) la variación dentro de una muestra da lugar a la variación del producto  $PV$ , esto se atribuye a las variaciones en el proceso de fabricación de partes (p.44). La variación de las partes se determina multiplicando el rango de los promedios de las partes  $\bar{R}_p$  por una constante  $k_3$ , donde la constante  $k_3$  depende del número de partes usado en los estudios de medidas y es el inverso de  $d_2^*$  (General Motors Corporation AIAG, 2010).

$$PV = \sigma_{parte} = \bar{R}_p k_3 = \frac{\bar{R}_{parte}}{d_2^*}$$

Reyes Rodríguez (2019) determinar la variación total  $TV$  o  $\sigma_{total}$  como una suma combinada del cuadrado de las variaciones de repetibilidad y reproducibilidad y la variación de las partes  $PV$  y aplicando la raíz cuadrada:

$$TV = \sigma_{total} = \sqrt{(EV)^2 + (OV)^2 + (PV)^2} \quad \text{o} \quad \sigma_{total} = \sqrt{\sigma_P^2 + \sigma_{R\&R}^2}$$

Existen diversas formas de analizar cuánto varían los resultados de un proceso. Este análisis se utiliza para determinar si la variación en las mediciones obtenidas es aceptable. General Motors Corporation (AIAG, 2010) determina un enfoque utilizando información histórica sobre las variaciones del proceso, asegurándose de que esté en control estadístico. Si la variación del proceso es conocida y su valor se basa en  $6\sigma$  datos precisos, entonces se pueden utilizar estas dos expresiones para analizar y mejorar el proceso.

$$TV = \sigma_{total} = \frac{\text{Variación del proceso}}{6\sigma}$$

General Motors Corporation (AIAG, 2010) enfoca el valor de índice de capacidad potencial de proceso de  $P_p$  son métricas clave que evalúan la capacidad del proceso para cumplir con las especificaciones establecidas, también puede relacionarse con estudios R&R.

$$P_p = TV = \frac{LSE - LIE}{6\sigma_p} = \frac{LSE - LIE}{6s} \quad y$$

Después de identificar la variabilidad asociada a cada factor en el estudio del sistema de medidas, esta puede contrastarse con la variación total  $TV$ .

**Tabla 6:**

*Porcentaje de contribución de factores a la variabilidad total.*

Factor de variabilidad	Porcentaje de contribución de variación
Variación de equipo	$\% EV = \frac{EV}{TV} \times 100 = \frac{\sigma_{repetibilidad}^2}{\sigma_{total}^2} \times 100$
Variación de los operadores	$\% EV = \frac{OV}{TV} \times 100 = \frac{\sigma_{reproducibilidad}^2}{\sigma_{total}^2} \times 100$
Variación de $\sigma_{R\&R}$	$\% \sigma_{R\&R} = \frac{\sigma_{R\&R}^2}{TV} \times 100 = \frac{\sigma_{R\&R}^2}{\sigma_{total}^2} \times 100$
Variación de parte	$\% EV = \frac{PV}{TV} \times 100 = \frac{\sigma_{parte}^2}{\sigma_{total}^2} \times 100$

*Nota.* La tabla muestra el porcentaje de contribución de cada factor de variabilidad al total de la variación observada en un proceso de medición, (Reyes, 2019).

Escalante (2013) interpreta los resultados del porcentaje de contribución de variación, por medio de los siguientes criterios:

- Si  $\% \sigma_{R\&R} \leq 10\%$  el sistema de medición es aceptable.
- Si  $10\% < \% \sigma_{R\&R} \leq 30\%$  el sistema de medición puede ser aceptable según su uso de aplicación, costo del instrumento de medición.
- $\% \sigma_{R\&R} > 30\%$  el sistema de medición es considerado como no aceptable y requiere de mejoras en cuanto al operador, equipo, método, condiciones, etc.

En su artículo Llamosa et al. (2007) tras el análisis de repetibilidad y reproducibilidad, se pueden identificar las causas de la variación del sistema:

- Si la repetibilidad predomina, podría ser un problema del instrumento, equipo, ubicación o variabilidad de las partes.
- Si la reproducibilidad es mayor, podría indicar falta de capacitación del operador o instrucciones inadecuadas.

### **2.1.6.2. Estudios Repetibilidad y Reproducibilidad con el método de ANOVA**

Según Botero et al. (2007) el método ANOVA es fundamental para analizar la variabilidad en sistemas de medición, ya que evalúa cómo la interacción entre operadores y partes afecta los resultados. Similar a su uso en diseños experimentales, ANOVA permite estudiar el impacto conjunto de estos factores sobre la variación de las mediciones, ayudando a entender cómo influyen en los resultados. Vargas & Bernal (2019) en su trabajo de investigación indica que, el método ANOVA es el más exacto para evaluar la variabilidad en un sistema de medición, ya que permite analizar la variación derivada de la interacción entre operadores y partes. Este enfoque utiliza una técnica estadística similar a la que se usa para estudiar cómo distintos factores influyen en los resultados en un diseño experimental. Por otra parte, Escalante (2013) indica el método de análisis de medias y rangos tiene ventaja de ser sencillo, pero el análisis de varianza (ANOVA) es más efectivo, ya que permite identificar y cuantificar más adecuadamente todas las fuentes de variación en el estudio R&R.

#### ***2.1.6.2.1. Estudios de Repetibilidad y Reproducibilidad por método ANOVA para dos factores***

En este método la variación total  $\sigma_{total}^2$  de los datos está dado de la siguiente forma:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{parte}^2 + \sigma_{operador}^2 + \sigma_{operador \times parte}^2 + \sigma_{instrumento}^2$$

también se cumplen las siguientes relaciones:

$$\sigma_{reptibilidad}^2 = \sigma_{instrumento}^2$$

$$\sigma_{reproducibilidad}^2 = \sigma_{operador}^2 + \sigma_{operador \times parte}^2$$

$$\sigma_{R\&R}^2 = \sigma_{reptibilidad}^2 + \sigma_{reproducibilidad}^2$$

reemplazando esas tres expresiones en la  $\sigma_{total}^2$ , se tiene:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{parte}^2 + \sigma_{reproducibilidad}^2 + \sigma_{reptibilidad}^2$$

Los componentes se evalúan utilizando la técnica ANOVA, que se aplica a un diseño factorial con efectos fijos y aleatorios. En este sistema de medición, ANOVA examina de manera simultánea dos fuentes de variación los operadores y las piezas (Gutiérrez & De la Vará, 2009).

De donde “O” representa a operarios, “P” partes, “r” número de repeticiones de las partes y N número total de datos. Al comprender estas variables y su relación, podemos analizar y evaluar la variabilidad y precisión del proceso de medición.

La suma de cuadrados y cuadrados medios es igual a igual a diseños experimentales

Según Escamilla et al. (2020) En un análisis de varianza ANOVA, la suma de los cuadrados del error refleja la repetibilidad, que es el error en las mediciones causadas por el instrumento utilizado. A continuación, se muestra la fórmula para calcular los componentes de varianza.

Operario (OV)	$\sigma_{operador}^2 = \frac{MC_O - MC_{OP}}{rp}$
Parte (PV)	$\sigma_{parte}^2 = \frac{MC_P - MC_{OP}}{ro}$
Interacción	$\sigma_{operador \times parte}^2 = \frac{MC_{OP} - MC_E}{r}$
Repetibilidad (EV)	$\sigma_{reptibilidad}^2 = \sigma_{instrumento}^2 = MC_E$

$$\begin{aligned} \text{Reproducibilidad (OV)} \quad & \sigma_{reproducibilidad}^2 = \sigma_{operador}^2 + \sigma_{operario \times parte}^2 \\ \text{R\&R} \quad & \sigma_{R\&R}^2 = \sigma_{reproducibilidad}^2 + \sigma_{repetibilidad}^2 \\ \text{Variación total (TV)} \quad & \sigma_{total}^2 = \sigma_{R\&R}^2 + \sigma_{parte}^2 \end{aligned}$$

**Tabla 7:**

ANOVA para un sistema de medición.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F – estadístico
Operador	$SC_O$	$o-1$	$MC_O = \frac{SC_O}{o-1}$	$\frac{MC_O}{MC_{OP}}$
Partes	$SC_P$	$p-1$	$MC_P = \frac{SC_P}{p-1}$	$\frac{MC_P}{MC_E}$
Interacción	$SC_{OP}$	$(o-1)(p-1)$	$MC_{OP} = \frac{SC_{OP}}{(o-1)(p-1)}$	$\frac{MC_{OP}}{MC_E}$
Repetibilidad (Error)	$SC_E$	$op(r-1)$	$MC_E = \frac{SC_E}{op(r-1)}$	
<b>Total</b>	$SCT$	$opr-1$		

*Nota:* Esta tabla analiza cómo diferentes factores como el operario que realiza la medición o la pieza que se está midiendo influyen en la precisión de un instrumento de medición. Tomado de Reyes (2019).

Escamilla et al. (2020) establecen que con un 99% de confianza, la variación en las mediciones debido al equipo y a los operadores se encuentra dentro de un rango de 5.15 desviaciones estándar. El análisis de repetibilidad y reproducibilidad R&R mide la proporción de la variación total que se debe al sistema de medición. Un sistema de medición es mejor cuando este porcentaje es menor.

Escamilla et al., (2020) la precisión de un sistema de medición se ve influenciada por la variabilidad de sus componentes. Para evaluar esta influencia, se utilizan índices de precisión/tolerancia  $IP/T$ . Tanto el análisis de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) como

los índices  $IP/T$  permiten determinar cómo la variabilidad afecta la capacidad del sistema para cumplir con las tolerancias especificadas.

**Tabla 8:**

*Porcentaje de contribución de variación mediante ANOVA*

Fuente	Desviación estándar ( $\sigma$ )	6 desviación estándar	% de la variación (desviación estándar)	% de Contribución (varianza)
Variación de Equipo (repetibilidad)	$M C_E = \sigma_E$	$EV = 6\sigma_E$	$\left(\frac{EV}{TV}\right) \times 100$	$\frac{\sigma_E^2}{\sigma_{total}^2} \times 100$
Variación de interacción	$\sigma_{OP}$	$6\sigma_{OP}$	$\left(\frac{V_{interacción}}{TV}\right) \times 100$	$\frac{\sigma_{OP}^2}{\sigma_{total}^2} \times 100$
Variación del operador	$\sigma_O$	$6\sigma_O$	$\left(\frac{OV}{TV}\right) \times 100$	$\frac{\sigma_O^2}{\sigma_{total}^2} \times 100$
Reproducibilidad	OV	$6OV$	$\left(\frac{Re\ produ}{TV}\right) \times 100$	$\frac{OV^2}{\sigma_{total}^2} \times 100$
Variación Parte – Parte	$\sigma_P$	$6\sigma_P$	$\left(\frac{PV}{TV}\right) \times 100$	$\frac{\sigma_P^2}{\sigma_{total}^2} \times 100$
R&R	$\sigma_{R\&R}$	$6\sigma_{R\&R}$	$\left(\frac{R\ \&\ R}{TV}\right) \times 100$	$\frac{\sigma_{R\&R}^2}{\sigma_{total}^2} \times 100$
Variación Total	$TV = \sigma_{total}$			

*Nota.* La tabla muestra cómo calcular el porcentaje de contribución de cada factor de variación a la variación total de un proceso de medición, (Reyes 2019).

El criterio para determinar si el sistema de medición es preciso, basado en el índice de precisión/tolerancia  $IP/T$  del medidor R&R total, es el siguiente:

- $(IP/T)_{R\&R} \leq 10\%$  ; sistema de medición excelente.
- $10\% < (IP/T)_{R\&R} \leq 20\%$  ; sistema bueno.
- $20\% < (IP/T)_{R\&R} \leq 30\%$  ; sistema marginal.

- $(IP/T)_{R\&R} > 30\%$  ; sistema inaceptable, debe ser corregido.

### 2.1.6.2.2. Estudios de Repetibilidad y Reproducibilidad para tres factores

Los componentes se evalúan utilizando la técnica ANOVA, que se aplica a un diseño factorial con efectos fijos y aleatorios. En este sistema de medición, ANOVA examina de manera simultánea tres fuentes de variación los operadores O, balanzas B y las piezas P (Gutiérrez & De la Vará , 2009). Para determinar la suma de cuadrado, cuadrados medios se utilizan las mismas propiedades estudiadas en diseño de experimentos mixtos con tres factores.

Variación total del sistema R&R, teniendo dos factores fijos partes y balanzas y un factor aleatorio operario, las componentes de variación es:

$$\sigma_T^2 = \sigma_P^2 + \sigma_O^2 + \sigma_B^2 + \sigma_{PO}^2 + \sigma_{PB}^2 + \sigma_{OB}^2 + \sigma_{POB}^2 + \sigma_E^2$$

**Tabla 9:**

*ANOVA para un Sistema de Medición.*

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F – estadístico
Operadores	$SC_O$	$o-1$	$MC_O = \frac{SC_O}{o-1}$	$\frac{MC_O}{MC_E}$
Balanzas B	$SC_B$	$b-1$	$MC_B = \frac{SC_B}{b-1}$	$\frac{MC_B}{MC_{BO}}$
Parte P	$SC_P$	$p-1$	$MC_P = \frac{SC_P}{p-1}$	$\frac{MC_P}{MC_{PO}}$
Inte. OB	$SC_{OB}$	$(o-1)(b-1)$	$MC_{OB} = \frac{SC_{OB}}{(o-1)(b-1)}$	$\frac{MC_{BO}}{MC_E}$
Inte. OP	$SC_{OP}$	$(o-1)(p-1)$	$MC_{OP} = \frac{SC_{OP}}{(o-1)(p-1)}$	$\frac{MC_{OP}}{MC_E}$
Inte. BP	$SC_{BP}$	$(b-1)(p-1)$	$MC_{BP} = \frac{SC_{BP}}{(b-1)(p-1)}$	$\frac{MC_{PB}}{MC_{OBP}}$
Inte. OBP	$SC_{OBP}$	$(a-1)(b-1)(p-1)$	$MC_{OBP} = \frac{SC_{OBP}}{(o-1)(b-1)(c-1)}$	$\frac{MC_{OBP}}{MC_E}$

Repetibilidad d (Error)	$SC_E$	$bpo(r-1)$	$MC_E = \frac{SC_E}{obp(r-1)}$
<b>Total</b>	<b><math>SCT</math></b>	<b><math>bpor-1</math></b>	

*Nota:* Esta tabla analiza cómo diferentes factores como el operario que realiza la medición o la pieza que se está midiendo influyen en la precisión de un instrumento de medición. Tomado de Reyes (2019).

$$\text{Varianza de error (repetibilidad)} \quad \sigma_E^2 = \sigma_{\text{repetibilidad}}^2 = CME$$

$$\text{Variación de reproducibilidad:} \quad \sigma_{\text{reproducibilidad}}^2 = \sigma_O^2 + \sigma_B^2 + \sigma_{OB}^2 + \sigma_{OP}^2 + \sigma_{BP}^2 + \sigma_{OBP}^2$$

$$\text{Variación de R\&R:} \quad \sigma_{R\&R}^2 = \sigma_{\text{reproducibilidad}}^2 + \sigma_{\text{reproducibilidad}}^2$$

$$\text{Variación total:} \quad \sigma_{\text{total}}^2 = \sigma_P^2 + \sigma_{R\&R}^2$$

El porcentaje de variación total se obtiene dividiendo la variación de cada factor entre la variación total.

$$\% \text{ de la variación total} = \%TV = \left( \frac{\sigma_{\text{factor}}}{\sigma_{\text{total}}} \right) \times 100$$

El porcentaje de contribución de cada uno de los factores es:

$$\% \text{ contribución} = \left( \frac{\sigma_{\text{factor}}^2}{\sigma_{\text{total}}^2} \right) \times 100$$

### 2.1.7. Empresa Marasal S.A

La empresa tiene dos décadas de experiencia dentro del sector industrial de sal, posibilitando la comercialización de sus productos a nivel internacional, nacional y local, en estricto apego a las normas de calidad, la empresa Marasal S.A posee un organigrama formal que represente su estructura organizativa y jerárquica.

#### 2.1.7.1. Instalación y medios operativos

Planta de procesamiento de sal. - La planta de procesamiento de sal tiene tres locales de aproximadamente 300 m<sup>2</sup> cada uno, en un terreno total de 1812 m<sup>2</sup>. Dentro de la planta, hay

173,7 m<sup>2</sup> destinados a oficinas, incluyendo la gerencia financiera. Tras recibir el requerimiento de sal, esta se almacena para su uso, tratamiento y yodación comercial.

Maquinaria. - La empresa dispone de dos máquinas seleccionadoras, dos clasificadoras de impurezas, una mezcladora con yodo, 6 balanzas para 50 kilos de sal, 4 balanzas para 1 kilo, 2 balanzas para medio kilo y 5 máquinas de coser.

Personal. - La planta de procesamiento de sal emplea aproximadamente a 120 personas en diversas áreas, incluyendo el procesamiento y el envasado, así como en el control de sistemas de medición de la sal en sus distintas presentaciones. De estas, 6 personas son responsables de medir los pesos de 50kg y 10 personas del medir el peso de 1 kilo y medio kilo.

Materia Prima. - La planta cuenta con tres almacenes para el acopio de sal, que se utiliza como materia prima. Posteriormente, este producto es trasladado para su procesamiento y envasado en diversas presentaciones, preparándolo así para su comercialización.

#### **2.1.7.2 Producto**

La sal en su estado natural tiene impurezas en control de calidad, por lo que se somete a un tratamiento para hacerla comercializable. En el proceso de envasado, se utilizan bolsas de polietileno o polipropileno con una capacidad de 1 kg (1000 gramos). En términos de granulometría, la sal gruesa tiene un tamaño superior a 2 mm, similar a la sal de 50 kg; la sal semi gruesa presenta un granulado intermedio que facilita una disolución moderada; Mientras que la sal fina, con un granulado más pequeño, es ideal para el uso doméstico. Las bolsas están disponibles en tres presentaciones distintas: gruesa, semi gruesa y fina, cada una con características específicas y diferentes pesos.

## Figura 7

### Control de Sistemas de Medida de la Sal en sus Diferentes Presentaciones



*Nota:* En la figura se muestra las medidas de los pesos de la bolsa de la sal de maras en gramos y los instrumentos de medida. Fuente tomado Empresa Marasal.



*Nota:* La figura muestra las medidas de los pesos de las bolsas de sal de un saco en kilos y los instrumentos de medida. Fuente tomado Empresa Marasal.

## 2.2. Marco Conceptual

**Calidad:** La empresa se dedica a satisfacer las necesidades de sus clientes, empleados, inversores y la sociedad (Irurita & Villanueva , 2012).

**Control de calidad:** El control de calidad es un sistema de técnicas y procedimientos que la dirección implementa para asegurar la calidad del producto (Cabezón, 2014).

**Repetibilidad:** Repetibilidad significa obtener resultados similares en mediciones o experimentos cuando las condiciones no cambian. Es esencial en la metodología científica y requiere el uso de las mismas herramientas, procedimientos y observadores, así como realizar mediciones en un corto período de tiempo (Portuondo & Portuondo, 2010).

**Reproducibilidad:** Se refiere a la habilidad de un experimento o estudio para ser replicado por otros investigadores que utilizan los mismos datos y métodos que se emplearon originalmente (Portuondo & Portuondo, 2010).

**Estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad R&R:** Se define como la variabilidad bajo condiciones controladas y resalta la necesidad de evaluarla mediante métodos estadísticos como el ANOVA. Además, enfatiza la importancia de un sistema de medición confiable para lograr resultados precisos (Colín, 2017).

**Análisis de control de procesos:** Es una herramienta efectiva para mejorar la calidad durante la fabricación (Falcón, 2006).

**Capacidad de Sistema de medición:** Es el resultado coherente y reproducibles, independientemente del operador, el equipo utilizado o las condiciones ambientales.

**Sal:** Es un producto cristalino compuesto principalmente de cloruro de sodio (NaCl), utilizado para preparar y sazonar alimentos, así como en la industria alimentaria como conservante y saborizante (Hunbert, 2024).

**Envases de Sal de Maras:** Recipientes utilizados para almacenar y comercializar la sal de Maras.

**Diseño de Experimentos DOE:** Busca definir las pruebas necesarias y su ejecución para obtener datos que, mediante análisis estadísticos, ofrezcan evidencias objetivas. Esto ayuda a

aclarar incertidumbres en un proceso, resolver problemas o lograr mejoras (Gutiérrez & De la Vará, 2009).

**Análisis de Varianza ANOVA:** ANOVA es el método más preciso para calcular la variabilidad en un sistema de medición, ya que cuantifica la variación debida a la interacción entre operadores y las partes medidas (Vargas & Bernal , 2019).

**Gráficos de Control:** Las gráficas de control de calidad son diagramas que permiten examinar y asegurar la estabilidad de un proceso (SPC, 2013).

## **2.3. Antecedentes Empíricos de la Investigación**

### **2.3.1. Antecedentes Internacionales**

Bernal & Vargas (2019) realizó la investigación, teniendo como objetivo aplicar el método ANOVA en el análisis de medición de pastillas de freno en vehículos para evaluar la variabilidad de los datos en relación con los procesos de control. El diseño utilizado se centró en analizar resultados de medición de pastillas de freno en vehículos mediante ANOVA. El objetivo principal de esta investigación fue implementar el método ANOVA análisis de varianza en el estudio de mediciones, con un enfoque en la repetibilidad y reproducibilidad de los resultados obtenidos bajo diferentes escenarios. El estudio destaca la importancia de analizar diversas variables que pueden influir en las mediciones, como el operario, las herramientas de medición y los métodos empleados. Mediante el uso del ANOVA, los autores lograron identificar cuáles de estas variables son significativas en el proceso de medición, lo que permite mejorar la precisión y la fiabilidad de los resultados. Este trabajo de investigación no solo proporciona un análisis riguroso de las mediciones en las pastillas de freno, sino que también establece un marco metodológico que puede ser aplicado en otros estudios similares, haciendo una contribución valiosa al campo de la ingeniería automotriz.

Reyes (2019) realizó un estudio cuyo objetivo fue analizar y comparar distintos métodos de repetibilidad y reproducibilidad en sistemas de medición. La metodología de la investigación se ejecutará en siete etapas, utilizando datos del manual de Análisis del Sistema de Medición (MSA) y aplicando un diseño ANOVA, así como métodos del Automotive Industry Action Group (AIAG) y del Proceso de Evaluación de la Medición (EMP). Además, se aplicó un diseño experimental cruzado simple. Para la recolección de datos, participan tres operadores que realizaron tres mediciones en cuatro piezas. Al concluir el estudio, se observó que el método EMP resultó ser más preciso que el método AIAG. Este hallazgo se derivó de comparar los coeficientes de variación, calculados a partir de la desviación estándar y la media, así como el coeficiente de variación intraclases de ambos métodos. En definitiva, se determina que el EMP presenta un rango de variación menor, lo que lo hace superior en términos de precisión frente al método AIAG.

Bello (2019) realizó un estudio cuyo objetivo fue la optimización del trabajo en procesos a través del diseño de experimentos y escenarios de simulación, el enfoque de esta investigación se centra en tres herramientas principales: la filosofía Lean Manufacturing, la simulación de eventos discretos y el diseño de experimentos busca identificar los factores significativos que influyen en el proceso. Los resultados determinaron implementar sistema esbelto que integra Lean Manufacturing, diseño de experimentos y simulación, demostrando que un modelo eficiente no requiere grandes cantidades de trabajo en procesos. Además, se destaca que el exceso de procesos genera costos innecesarios en materiales y almacenamiento.

Terrazas (2019) llevó a cabo un estudio para determinar cómo la velocidad de corte, el avance y el paso afectan el maquinado de una pieza de acero al carbono en un torno CNC, el análisis se realizó aplicando métodos estadísticos como la relación señal-ruido de Taguchi, análisis de varianza y regresión y se utilizó un diseño experimental con arreglo ortogonal L-

18 en un centro de torneado. La muestra consistió en 18 piezas de acero, y se realizaron dos réplicas siguiendo el mismo arreglo ortogonal. La conclusión fue que los procesos de mejora continua y el uso de diseño de experimentos y herramientas estadísticas son enfoques efectivos para mejorar la fabricación de piezas metálicas en tornos CNC, reduciendo defectos y mejorando la calidad.

### **2.3.2. Antecedentes Nacionales**

Urquiza & Torres (2023) se realizó un estudio con el fin de proponer la implementación de la metodología Six Sigma, ampliamente conocida por su enfoque en la reducción de la variabilidad y la mejora continua, utilizó la metodología Six Sigma, se emplearon herramientas estadísticas y de gestión de procesos para identificar las causas raíz de los defectos y desarrollar soluciones para minimizarlos y su enfoque fue el ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar) como marco de trabajo para la organización y ejecución del proyecto. Se llegó a una conclusión que la implementación de Six Sigma resultó en una reducción de la tasa de defectos del 29.45% (2022) al 0.57% (2023) en la empresa metalmecánica, generando un ahorro proyectado de S/. 167,781.38 a 5 años.

Huerta (2023) realizó un estudio cuyo objetivo fue orientado a establecer el espacio de diseño para la viscosidad en un gel de diclofenaco sódico al 1 %, fue un enfoque de diseño de experimentos, en este estudio, se seleccionó la viscosidad como atributo crítico de calidad mediante un análisis de riesgo, siendo la concentración de trietanolamina y carbómero los factores clave que la determinan. El diseño experimental utilizado fue un diseño factorial  $3^2$ , generando nueve formulaciones con tres réplicas cada una, para un total de 27 experimentos realizados aleatoriamente bajo condiciones controladas, los resultados mostraron que la concentración de trietanolamina y carbómero, así como su interacción, afecta significativamente la viscosidad del gel ( $p < 0,05$ ). Estos hallazgos confirman que la interacción entre los componentes estudiados permite predecir. Se desarrolló un modelo de

regresión lineal múltiple con un coeficiente de determinación del 98,41% y uno ajustado del 97,70%, representando matemáticamente el espacio de diseño.

Mallqui (2018) el objetivo fue aplicar la metodología Six Sigma para la mejora continua en una empresa fabricante de sacos de polipropileno. El diagnóstico reveló dificultades para disminuir la merma, que se redujo ligeramente de 5.5% en 2016 a 5% en el primer semestre de 2017, la investigación fue de carácter aplicado y se desarrolló siguiendo las fases DMAIC: definir, medir, analizar, mejorar y controlar y los resultados que se obtuvieron después de implementar Six Sigma fueron 85% de la merma provenía de los procesos de extrusión y telares, esto permitió reducir el scrap al 3.8% en 2017 y al 3.7% en 2018, generando un ahorro anual de 117 mil dólares.

Reinoso (2019) su propósito de su estudio fue investigar la aplicación de Six Sigma como una herramienta para minimizar la cantidad de neumáticos nuevos defectuosos que llegan a los clientes, con el fin de reducir los costos, mejorar la calidad y aumentar la satisfacción del cliente y tuvo un diseño experimental, y la recopilación de datos se realizó durante el tiempo de duración del proyecto. Los equipos de cada departamento fueron responsables de identificar y clasificar los tipos de defectos en los neumáticos, asignándolos a cada inspector para asegurar la precisión en la recolección y el registro de datos, lo cual fue clave para el análisis posterior. La conclusión fue un análisis de costo-beneficio reveló que las mejoras planteadas son beneficiosas y efectivas.

Tejada (2014) el objetivo de esta investigación fue determinar las propiedades de la quitina nativa extraída de los exoesqueletos de la *Emerita analoga* ("muy muy"), como adsorbente para la remoción de hierro total en efluentes. Mediante el método de la fenantrolina, se determinaron las concentraciones de hierro, con límites de detección de 0.074 mg/L y de cuantificación de 0.230 mg/L. Se investigó la cinética de adsorción modificando factores como pH, tamaño de partícula y cantidad de adsorbente, encontrando que el modelo

de adsorción de segundo orden fue el que mejor describió el proceso, con un coeficiente de determinación de 0.976. Los resultados muestran que los isothermas de Langmuir y Freundlich indicaron una capacidad de adsorción máxima de 2.546 mg/g, siendo el modelo de Freundlich el que mejor se ajustó a los datos, con un  $R^2$  de 0.944. El análisis factorial reveló que la dosis de adsorbente es el factor más influyente. Las condiciones óptimas teóricas para lograr una adsorción del 100% incluyen una dosis de 3,6 g/L, un pH de 5,9, una concentración inicial de 2,2 mg/L y un tamaño de partícula de 46,6  $\mu\text{m}$ . La quitina nativa se presentó como una solución económica, sencilla y viable para la descontaminación de efluentes ricos en hierro, contribuyendo a la protección ambiental.

### ***2.3.3. Antecedentes Locales***

Estrada (2023) tuvo como objetivo analizar la variación en el rendimiento de 36 genotipos de trigo harinero mediante una evaluación comparativa y un análisis estadístico, Se aplicó un diseño experimental de bloques completos al azar en el distrito de Zurite en el año 2020, para este estudio, se utilizó un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones, evaluando 10 plantas o partes de plantas para cada variable estudiada, el rendimiento fue determinado mediante la cosecha del área específica de la parcela, aplicando un muestreo probabilístico aleatorio. Entre los principales hallazgos, el análisis de conglomerados identificó tres grupos de tratamientos que compartían características similares en las variables estudiadas. Como conclusión, se determinó que las variables evaluadas tienen una influencia significativa en el rendimiento del trigo harinero, y que el diseño experimental utilizado fue el adecuado para analizar el comportamiento de los 36 genotipos.

## 2.4 Hipótesis

### *a. Hipótesis General*

Un diseño experimental centrado en estudios de repetibilidad y reproducibilidad evalúa de manera efectiva la calidad del sistema de medición de la sal de Maras, 2023.

### *b. Hipótesis Específicas*

1. Existe interacciones entre los factores operador, balanzas y parte del sistema de medición de la sal de Maras, 2023.
2. Los diagramas de control de calidad identificarán los patrones que indiquen problemas en el sistema de medición de la sal de Maras, 2023.

## 2.5. Identificación de Variables e Indicadores

Este estudio se centra en dos variables clave para el control de calidad de la medición: el sistema de medidas y la medida de los pesos de la sal de Maras. Ambas buscan asegurar la precisión y repetibilidad de los datos.

### **Variable:**

**Sistema de medición.** - Esta variable comprende todos los elementos que intervienen en el proceso de medición y que pueden influir en la variabilidad de los resultados.

### **Indicadores:**

- Operarios: hace referencia a la habilidad, experiencia y consistencia del personal encargado de realizar las mediciones.
- Balanzas: alude al instrumento de medición, considerando su estado de calibración, sensibilidad y precisión.
- Partes: se refiere a las muestras de las bolsas de sal de Maras evaluadas.

### **Variable:**

**Pesos.** - Esta variable representa los resultados concretos obtenidos a través del sistema de medidas, es decir, los valores de peso registrados para las muestras de sal de Maras.

## 2.6. Operacionalización de Variables

**Tabla 10:**

*Operacionalización de variables*

<b>Variables</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Definición operacional</b>	<b>Indicadores</b>
<b>Sistemas de medición</b>	Es un conjunto integral de instrumentos, dispositivos de medición, estándares, procedimientos, métodos, software, personal y condiciones ambientales que se utilizan para determinar una cantidad o para facilitar la valoración de una propiedad o característica en particular (AIAG, 2010).	Se realizan a través de la secuencia de acciones realizadas por los operarios, selección de las partes, pesaje en balanzas calibradas y registro de los datos obtenidos, siguiendo los procedimientos establecidos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operarios (personas)</li> <li>• Balanzas</li> <li>• Partes (bolsas)</li> </ul>
<b>Pesos (gramos)</b>	El peso es una fuerza fundamental que surge de la interacción gravitatoria entre dos objetos masivos. El peso de un objeto, medido en gramos, refleja la fuerza de atracción gravitacional que lo dirige hacia el centro del cuerpo astronómico más cercano (Guillarón et al., 2012)	El sistema de pesaje incluye la selección de una muestra de unidades de bolsas de sal. Cada unidad se pesa individualmente en una balanza industrial, siguiendo un procedimiento estándar de operación (SOP). Se recopilan los datos de peso en una hoja de cálculo y se procesan mediante métodos estadísticos.	

## CAPITULO III

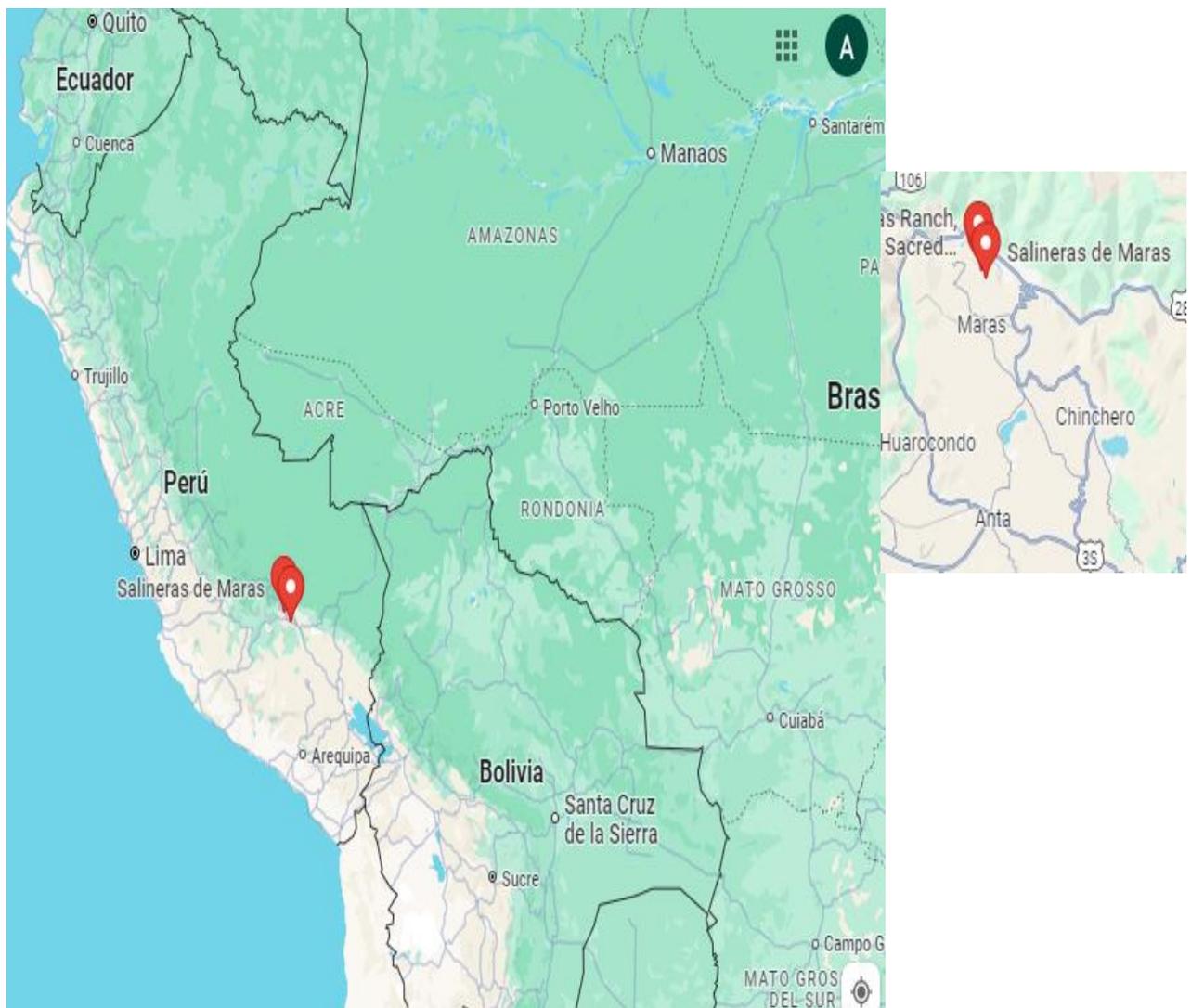
### METODOLOGÍA

#### 3.1. **Ámbito de estudio: Localización Política y Geográfica**

El estudio se centra en Marasal S.A., una empresa legalmente constituida en Cusco, dedicada a la producción, procesamiento, comercialización y exportación de sal y derivados, así como a la promoción del turismo relacionado.

#### **Figura 8**

*Ubicación geográfica de la empresa de Marasal S.A*



### **3.2. Tipo y Nivel de Investigación**

Tipo de investigación: El estudio adopta un enfoque cuantitativo, ya que se fundamenta en la medición de la variable analizada, y es de tipo aplicado, dado que emplea teorías para evaluar la eficacia del sistema de medición.

Nivel de investigación: El estudio es de nivel descriptivo, ya que busca caracterizar el sistema de medición de los productos de sal, y correlacional, porque analiza la relación entre las mediciones y factores.

Diseño: Este estudio es de tipo no experimental, ya que se analizan los fenómenos en su entorno natural, sin modificar las condiciones ni manipular los datos (Hernández et al., 2014). Además, tiene un enfoque transversal, ya que los datos se recopilan en un solo momento, durante el año 2023.

### **3.3. Unidad de Análisis**

La unidad de análisis del estudio es un operario, una bolsa de 1000 gramos de los pesos de la sal y una balanza.

### **3.4. Determinación del Tamaño de Muestra**

El estudio se enmarca en el control de calidad de los sistemas de medición del peso de la sal de Maras, mediante el uso de diseños experimentales mixtos, específicamente a través de un estudio de repetibilidad y reproducibilidad (R&R). Dado que el objetivo fue analizar la variabilidad del sistema de medición en condiciones controladas, no se aplicó una fórmula de tamaño muestral probabilístico tradicional. En su lugar, el tamaño de muestra se definió en función de un diseño factorial mixto estructurado con tres factores: partes (10 bolsas de sal seleccionadas de manera fija, representando diferentes unidades del producto), operadores (3 niveles seleccionados de forma aleatoria, para representar la variabilidad humana en la medición) e instrumentos (2 balanzas seleccionadas de forma fija, representando la variabilidad de los equipos de medición). A cada combinación de estos factores se le

aplicaron 3 repeticiones, lo que resultó en un total de  $10 \times 3 \times 2 \times 3 = 180$  observaciones. Esta cantidad de datos fue adecuada para realizar el análisis estadístico requerido, permitiendo estimar la variabilidad atribuible a cada fuente del sistema de medición, conforme a los lineamientos propuestos por Gutiérrez y De la Vara (2009) para estudios R&R.

### **3.5. Técnicas de Selección de Muestra**

En el presente estudio R&R, los operarios fueron seleccionados mediante muestreo aleatorio simple, eligiéndose a tres trabajadores capacitados directamente involucrados en el proceso de envasado de sal. Este tipo de selección permite estimar de forma objetiva la variabilidad atribuible al factor humano, asegurando representatividad y control en la evaluación de la reproducibilidad.

Respecto al instrumento de medición, se utilizaron dos balanzas industriales fijas previamente definidas, por lo que no se aplicó muestreo. La inclusión de ambas balanzas responde a un interés comparativo sobre su desempeño en condiciones operativas reales, siendo tratadas como niveles fijos dentro del diseño experimental.

Para el factor piezas, se seleccionaron diez bolsas de sal de 1000 gramos mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional o deliberado. Esta estrategia se justifica en tanto los estudios de repetibilidad y reproducibilidad requieren controlar la variabilidad del producto, seleccionando unidades que presenten condiciones homogéneas y representativas del proceso, permitiendo así que la evaluación se enfoque en la precisión y confiabilidad del sistema de medición dentro de un entorno estable, más que en la generalización de los resultados.

En términos metodológicos, esta forma de selección coincide con la definición de muestreo por conveniencia, entendido como aquel que incluye únicamente a los elementos

que cumplen ciertos criterios prácticos, como la disponibilidad, homogeneidad y facilidad de acceso (Reales et al., 2022, p. 683).

### **3.6. Técnicas de Recolección de Información**

La recolección de datos se llevó a cabo bajo condiciones controladas, con el propósito de minimizar los sesgos y asegurar la independencia de las mediciones, aspectos esenciales en los estudios de repetibilidad y reproducibilidad R&R. Se trabajó con 10 bolsas fijas de sal de 1000 gramos cada una, previamente codificadas. Estas unidades fueron asignadas aleatoriamente a los operarios, lo que impidió que pudieran reconocer cuál bolsa estaban pesando en cada caso, reduciendo así la posibilidad de sesgos, tanto conscientes como inconscientes, durante el proceso de medición.

Cada uno de los tres operarios realizó tres repeticiones por bolsa, distribuidas en tres turnos distintos del día (mañana, mediodía y tarde), lo que permitió analizar la variabilidad intra-operador a lo largo del tiempo, es decir, la repetibilidad. Para evaluar la reproducibilidad, se consideró la participación de diferentes operarios y el uso de dos balanzas industriales fijas, las cuales sí fueron conocidas por quienes realizaron las mediciones. Esto permitió observar el posible efecto del conocimiento del instrumento sobre la medición y, en consecuencia, estimar la variabilidad atribuible tanto al operario como al equipo de medición, componentes clave en la variabilidad total del sistema de medición.

### **3.7. Técnicas de Análisis e Interpretación de la Información**

El análisis e interpretación de los datos recolectados se centró en la evaluación del sistema de medición del peso de la sal, con el objetivo de determinar su precisión y confiabilidad en el contexto del control de calidad. Para este fin, se utilizaron herramientas estadísticas descriptivas e inferenciales, apoyadas en el software especializado Minitab.

En una primera etapa, se realizó una exploración preliminar de los datos mediante estadísticas descriptivas y pruebas de normalidad, diferenciadas por cada instrumento de

medición (Balanza 1 y Balanza 2). Esta etapa permitió verificar los supuestos estadísticos necesarios para los análisis posteriores, asegurando la validez del enfoque inferencial.

Posteriormente, se aplicaron diseños factoriales mixtos, incorporando factores fijos y aleatorios (partes, operarios e instrumentos), y se empleó el análisis de varianza ANOVA para evaluar la influencia de cada factor en la variabilidad del sistema de medición. Este análisis se complementó con comparaciones múltiples (prueba de Tukey), gráficas de efectos principales y diagramas de Pareto, que facilitaron la visualización e interpretación de los efectos individuales y combinados.

El núcleo del estudio consistió en la aplicación de estudios de repetibilidad y reproducibilidad (R&R), tanto en su modalidad cruzada como expandida, abarcando diversas combinaciones entre partes, operarios y balanzas. Dichos estudios permitieron cuantificar la proporción de variabilidad atribuible al sistema de medición frente a la variabilidad total observada, proporcionando una visión clara sobre su robustez.

Adicionalmente, se efectuó un análisis de capacidad del sistema de medición, evaluando su adecuación para cumplir con los requerimientos de control de calidad. Este análisis se complementó con la elaboración de gráficas de control, útiles para examinar la estabilidad del sistema a lo largo del tiempo y detectar fuentes de variación fuera de control.

En conjunto, este enfoque metodológico, respaldado en el uso del software Minitab, permitió realizar una evaluación integral y rigurosa del sistema de medición, proporcionando evidencia técnica y estadística sólida para fundamentar decisiones orientadas a la mejora continua del proceso de pesaje de sal.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS

Se utilizaron herramientas estadísticas como Minitab 21 versión trial para obtener los resultados y cumplir con los objetivos del estudio.

#### 4.1. Procesamiento y Análisis e Interpretación de Resultados de Exploración de Datos

##### Prueba de normalidad de los datos

Se realizaron las pruebas de normalidad antes de aplicar la metodología estadística para verificar la distribución normal de las mediciones. Para evaluar la normalidad de los pesos de la sal, medidos con dos balanzas, se aplicaron la prueba de Kolmogorov-Smirnov y análisis gráficos.

##### Tabla 11:

*Pesos de sal de 1000 gramos con balanza 1*

BALANZA 1									
	Operador A			Operador B			Operador C		
PARTES	Repet_1	Repet_2	Repet_3	Repet_1	Repet_2	Repet_3	Repet_1	Repet_2	Repet_3
1	1.0166	1.0166	1.0165	1.0165	1.0164	1.0165	1.0165	1.0164	1.0165
2	1.0146	1.0146	1.0145	1.0146	1.0146	1.0146	1.0145	1.0145	1.0146
3	1.015	1.015	1.0149	1.0151	1.0149	1.0151	1.015	1.015	1.015
4	1.0161	1.0161	1.0161	1.016	1.016	1.0161	1.016	1.016	1.016
5	1.0135	1.0135	1.0135	1.0135	1.0142	1.0142	1.0134	1.0134	1.0134
6	1.0155	1.0156	1.0156	1.0156	1.0155	1.0154	1.0154	1.0155	1.0155
7	1.014	1.0139	1.0139	1.0139	1.0139	1.0141	1.014	1.014	1.014
8	1.0145	1.0145	1.0144	1.0145	1.0146	1.0146	1.0144	1.0144	1.0145
9	1.0161	1.0161	1.0161	1.016	1.016	1.0161	1.016	1.016	1.016
10	1.0141	1.014	1.014	1.014	1.014	1.0141	1.0141	1.014	1.014

Fuente: Datos tomados de la Empresa Marasal S.A

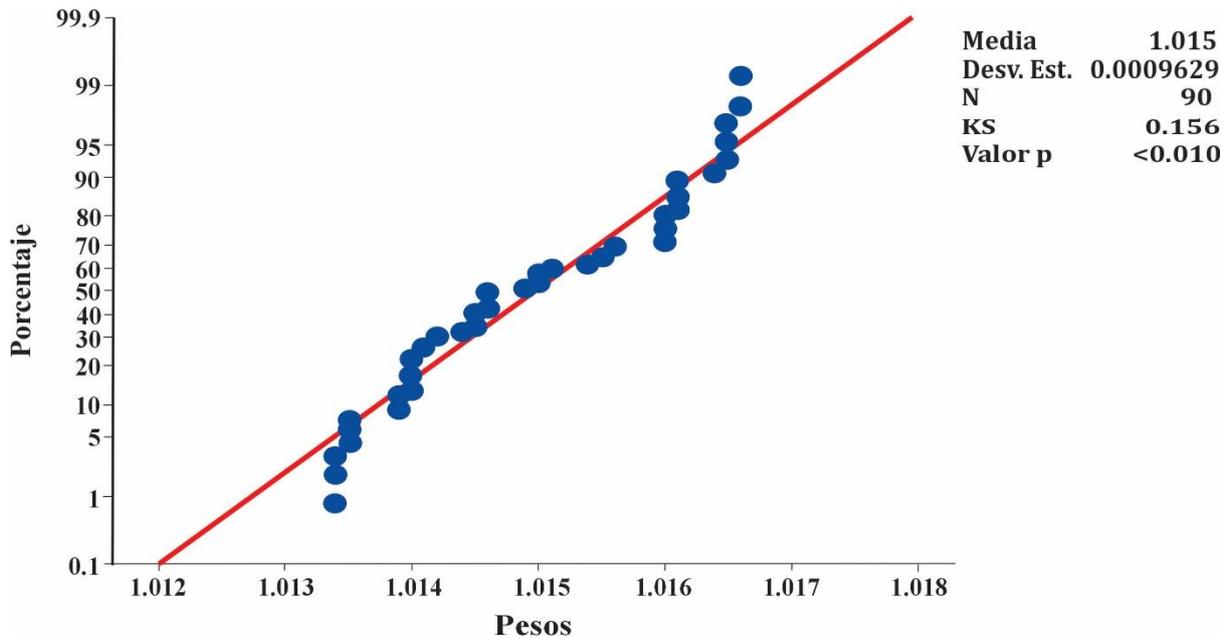
**Formulan las siguientes hipótesis:**

$H_0$  : Los datos presentan una distribución normal.

$H_a$  : Los datos no presentan una distribución normal.

**Figura 9**

*Gráfica Q- Q plot de los pesos de la sal de 1000 gr.*

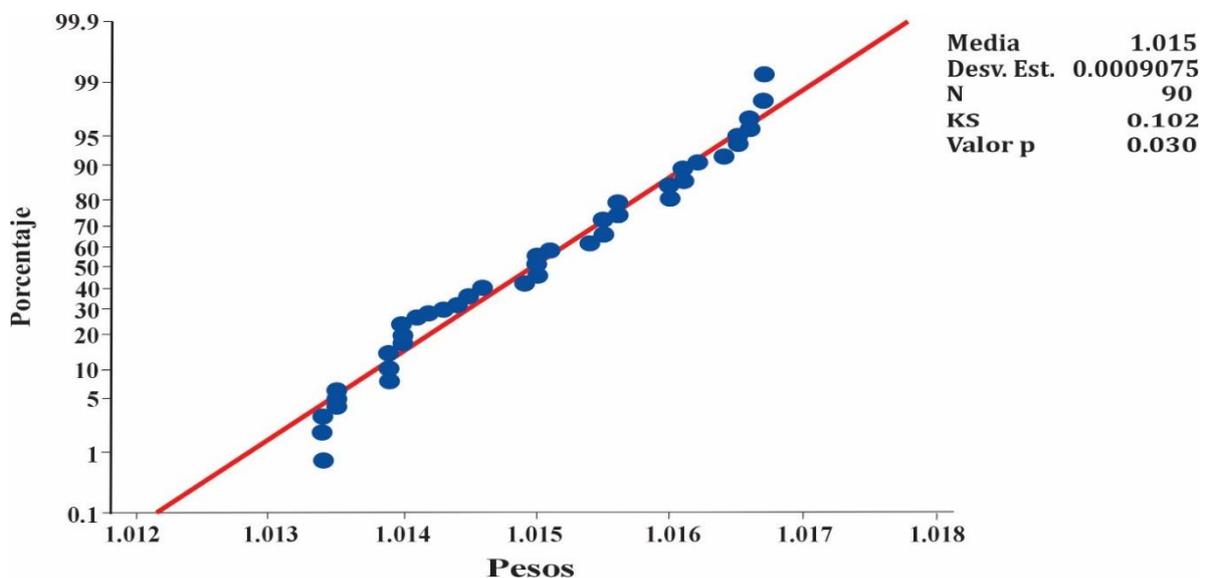


En la gráfica de Q-Q plot la mayoría de los puntos azules siguen la línea roja, indicando que la distribución de los pesos de sal se aproxima a la normalidad, aunque se observan ligeras desviaciones en los extremos, con datos menores en la cola inferior y mayores en la superior, destacándose una posible asimetría positiva o presencia de valores atípicos en el extremo superior derecho. El resultado de la prueba de Kolmogorov-Smirnov (p-valor < 0.05), tenemos evidencia estadística para concluir que los datos de los pesos de la sal de 1000 gr no presentan una distribución normal.

**Tabla 12:***Pesos de sal de 1000 gramos con balanza 2*

<b>BALANZA 2</b>									
	<b>Operador A</b>			<b>Operador B</b>			<b>Operador C</b>		
<b>PARTES</b>	<b>Repet_1</b>	<b>Repet_2</b>	<b>Repet_3</b>	<b>Repet_1</b>	<b>Repet_2</b>	<b>Repet_3</b>	<b>Repet_1</b>	<b>Repet_2</b>	<b>Repet_3</b>
1	1.0167	1.0167	1.0166	1.0165	1.0164	1.0164	1.0165	1.0162	1.0166
2	1.0145	1.0145	1.0144	1.0145	1.0146	1.0146	1.0144	1.0144	1.0145
3	1.015	1.015	1.0149	1.0151	1.0149	1.0151	1.015	1.015	1.015
4	1.0161	1.0161	1.0161	1.016	1.016	1.0161	1.016	1.016	1.016
5	1.0143	1.0135	1.0135	1.0135	1.0142	1.0142	1.0134	1.0134	1.0134
6	1.0155	1.0156	1.0156	1.0156	1.0155	1.0154	1.0154	1.0155	1.0155
7	1.014	1.0139	1.0139	1.0139	1.0139	1.0141	1.014	1.014	1.014
8	1.015	1.015	1.0149	1.0149	1.0151	1.015	1.015	1.015	1.015
9	1.0155	1.0156	1.0156	1.0156	1.0155	1.0154	1.0154	1.0155	1.0155
10	1.014	1.0139	1.0139	1.0139	1.0139	1.0141	1.014	1.014	1.014

Fuente: Datos tomados de las mediciones de los pesos de la empresa Marasal S.A

**Formulan las siguientes hipótesis:** $H_0$  : Los datos proviene de una distribución normal. $H_a$  : Los datos no proviene de una distribución normal.**Figura 10***Gráfica Q- Q plot de los pesos de la sal de 1000 gr.*

En la gráfica de Q-Q plot la muestra que los pesos de sal siguen aproximadamente una distribución normal en su parte central, aunque se observan ligeras desviaciones en los extremos, con puntos por debajo de la línea roja en la cola inferior izquierda y por encima en la cola superior derecha basándonos en el resultado de la prueba de Kolmogorov-Smirnov ( $p$ -valor  $< 0.05$ ), tenemos evidencia estadística para concluir que los datos de los pesos de la sal de 1000 gr no provienen de una distribución normal.

#### 4.2. Procesamiento, Análisis e Interpretación Resultados Diseños Factoriales (DOE)

El estudio R&R y el diseño factorial completo evalúan la variación en mediciones de los pesos de la sal de Maras. Con 3 operarios, 2 balanzas y 10 partes, el diseño factorial considera todas las combinaciones posibles de estos factores.

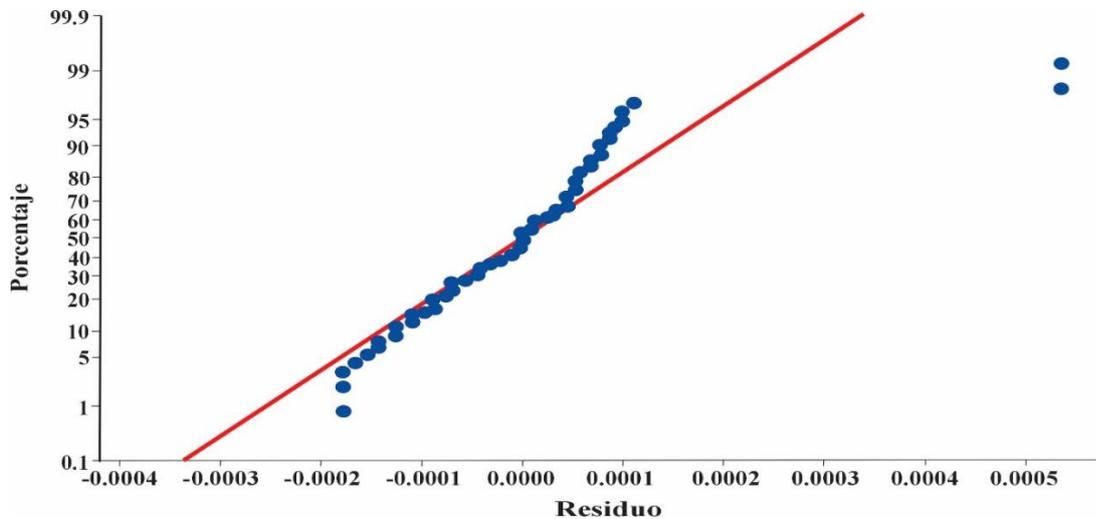
##### 4.2.1. Resultado del diseño factorial mixto de dos factores

Este diseño experimental factorial mixto considera dos factores, el factor operario es aleatorio tres operarios diferentes miden los pesos de la sal y el segundo factor parte es fijo diez piezas distintas o bolsas de sal de 1000 gramos, cada parte o bolsa se mide 3 veces o replicamos 3 veces. Utilizamos el modelo lineal matemático de dos factores mixtos para la variable de respuesta de pesos de la sal de 1000 gramos obtuvimos los siguientes resultados:

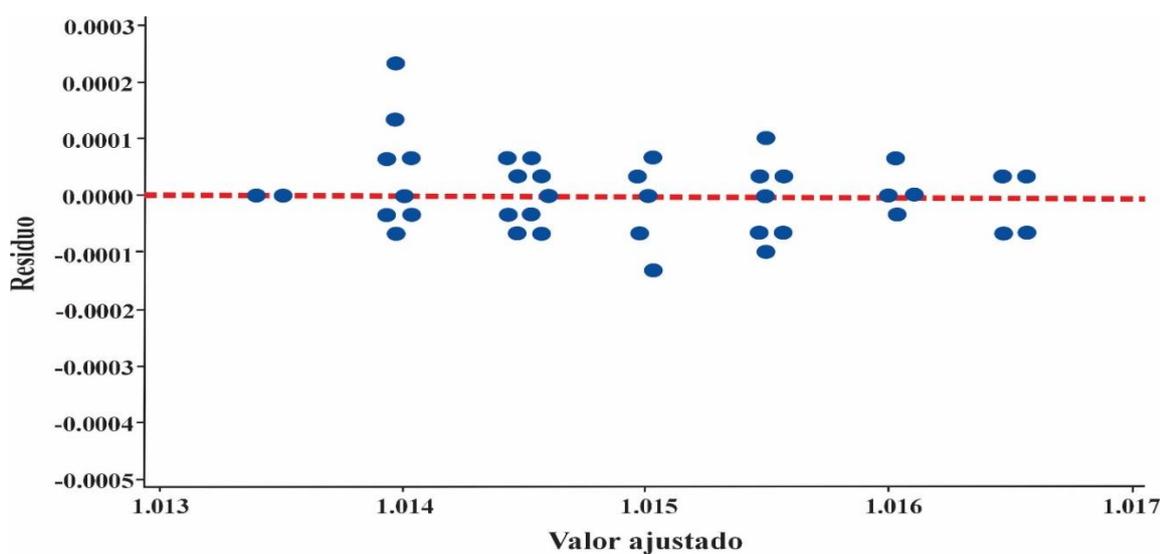
**Tabla 13:**

*Información de factores*

<b>Factor</b>	<b>Tipo</b>	<b>Niveles</b>	<b>Valores</b>
Partes	Fijo	10	1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10
Operarios	Aleatorio	3	A; B; C

**Figura 11***Supuesto de normalidad*

La Figura 11 la distribución de los residuos para la variable pesos muestra una tendencia general a seguir una línea recta, lo que indica una aproximación a la normalidad. No obstante, en los extremos, especialmente en la parte superior derecha, se identifican dos puntos que se desvían de la línea, lo que sugiere la presencia de valores atípicos o una leve desviación de la normalidad en la cola superior.

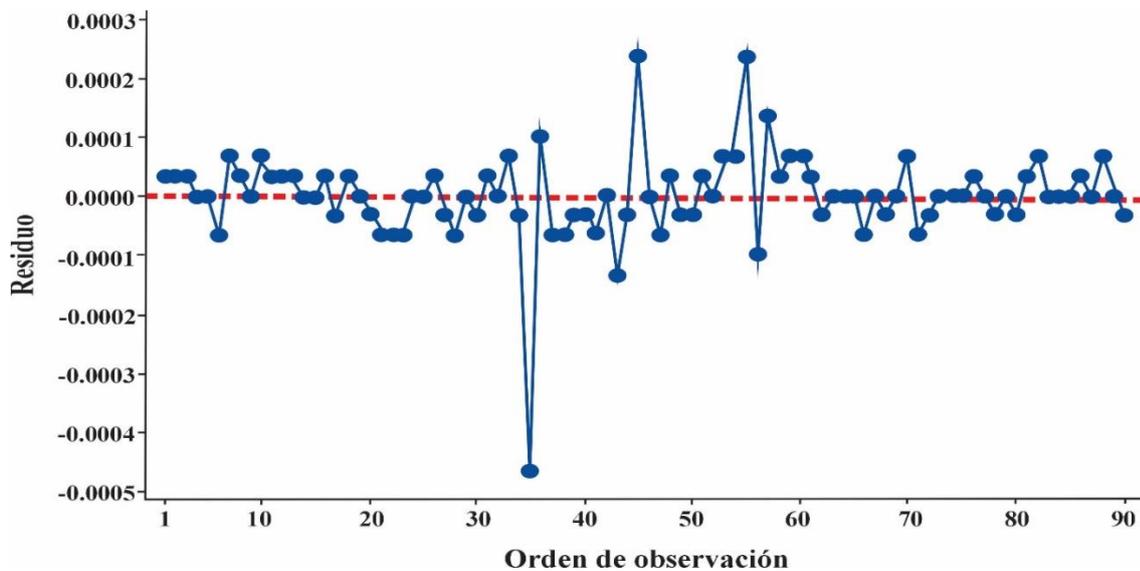
**Figura 12***Supuesto de varianza constante (Homocedasticidad)*

La Figura 12 la dispersión aleatoria de la mayoría de los puntos alrededor de la línea horizontal de cero sugiere que la varianza de los residuos se mantiene relativamente constante

para los distintos valores ajustados. No se observa un patrón claro en la distribución, como formas de embudo, curvaturas pronunciadas o variaciones notables en la dispersión a lo largo del eje horizontal. Aunque algunos puntos se alejan más de la línea, esto es normal en cualquier conjunto de datos y no implica necesariamente un problema de heterocedasticidad.

**Figura 13**

*Supuesto de independencia.*



La Figura13 los residuos fluctúan de manera irregular alrededor de la línea de cero, sin mostrar tendencias claras, ciclos repetitivos ni largas secuencias de signos iguales, lo que sugiere independencia entre observaciones. Aunque se observa una fluctuación notable cerca de la observación 35, esta no implica necesariamente una falta general de independencia.

**Tabla 14:**

*Análisis de varianza ANOVA para dos factores mixtos operarios y partes en sistema de medidas de pesos de sal.*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Operarios	2	0.000000	0.000000	1.84	0.187
Partes	9	0.000081	0.000009	294.94	0.000
Partes*Operarios	18	0.000001	0.000000	3.58	0.000
Error	60	0.000001	0.000000		
Total	89	0.000083			

## Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.0000925	99.38%	99.08%	98.60%

La Tabla 14 del ANOVA muestra que el factor partes es la principal fuente de variabilidad, con un alto valor  $F = 294.94$  y un  $p$ -valor  $< 0,05$ . En cambio, el factor operario tiene un  $p$ -valor  $> 0,05$ , indica que no existe diferencia significativa en la variabilidad de los pesos según los distintos operarios. Sin embargo, la interacción entre la parte y operario tiene  $p$ -valor  $< 0,05$ , indica que existe diferencia significativa en la variabilidad de los pesos según los distintos operarios y partes.

En el modelo,  $R^2 = 0,9938$  lo que indica que 99,38% de la variabilidad de los pesos es debido a los diferentes operarios y a las diferentes partes. Según el  $R^2$  ajustado el 99,08% de la variabilidad en el peso es explicado por el modelo y  $R^2$  predictivo el 98,60% indica una excelente capacidad de predicción del modelo.

### Comparación por pares de Tukey: Partes

**Tabla 15:**

*Comparación de medias para las partes (producto) en los sistemas de pesos de sal través de la prueba Tukey y una confianza de 95%*

Partes	Media	Agrupación
1	1.01650	A
4	1.01604	B
9	1.01604	B
6	1.01551	C
3	1.01500	D
2	1.01457	E
8	1.01449	E
10	1.01403	F
7	1.01397	F
5	1.01362	G

En la tabla 15 la parte 1 muestra el mayor peso promedio de sal (Grupo A), mientras que la Parte 5 presenta el más bajo (Grupo G). Entre ambos extremos, existen grupos intermedios (B, C, D, E, F) con pesos estadísticamente similares entre sí, pero diferentes de los extremos. Algunas partes forman grupos individuales debido a diferencias significativas (Partes 1, 6, 3 y 5), mientras que otras, como las Partes 4 y 9, 2 y 8, y 10 y 7, se agrupan al no presentar diferencias significativas al 95% de confianza.

### Comparación por pares de Tukey: Operarios por partes

**Tabla 16:**

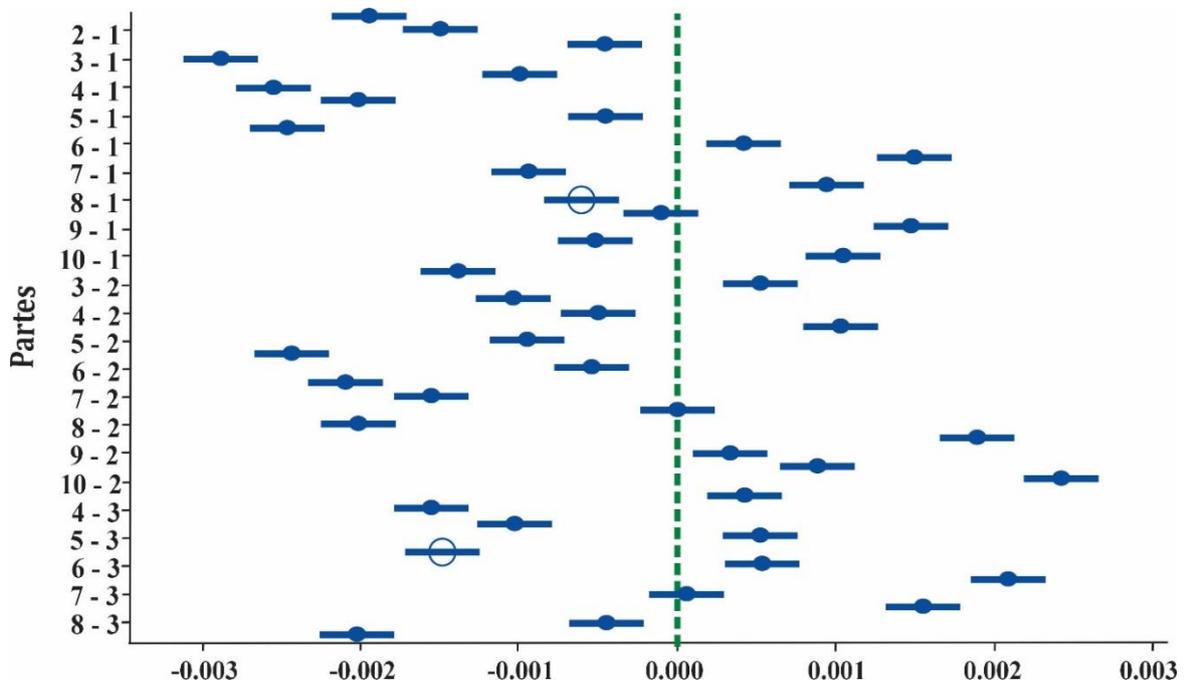
*Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%*

<b>Operarios*Partes</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
A 1	1.01654	A
B 1	1.01649	A
C 1	1.01647	A
A 4	1.01608	B
A 9	1.01608	B
B 9	1.01605	B
B 4	1.01605	B
C 4	1.01601	B
C 9	1.01601	B
A 6	1.01554	C
B 6	1.01551	C
C 6	1.01548	C
B 3	1.01503	D
C 3	1.01499	D
A 3	1.01498	D
B 2	1.01459	E
A 2	1.01457	E
B 8	1.01454	E
C 2	1.01454	E
A 8	1.01448	E
C 8	1.01445	E
B 10	1.01404	F
A 10	1.01403	F
C 10	1.01402	F
C 7	1.01398	F
B 7	1.01397	F
A 7	1.01395	F
B 5	1.01383	F
A 5	1.01355	G
C 5	1.01348	G

La tabla 16 indica la prueba de Tukey agrupó las medias en 7 grupos distintos (A hasta G), donde Las combinaciones de los operarios A, B y C con la parte 1, grupo A presentan los pesos promedio de sal más altos. Las partes 4 y 9 grupo B, parte 6 grupo C, parte 3 grupo D, partes 2 y 8 grupo E, y partes 10 y 7 grupo F muestran pesos promedio progresivamente menores, siempre sin diferencias significativas entre operarios para una misma parte. La parte 5 grupo G tiene los pesos más bajos."

**Figura 14**

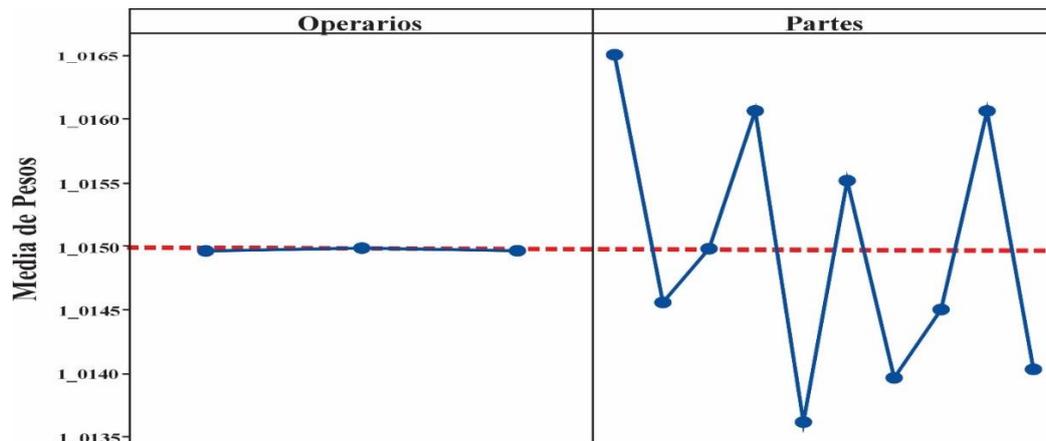
*ICS simultáneos de 98% de Tukey en Diferencia de las Medias para los Pesos de la Sal.*



En la figura 14 se pueden ver las partes 7 y 3, 8 y 2, 9 y 1 las medias de estas partes se encuentran dentro del intervalo que incluye a cero, lo que indica que no existe diferencia significativa en la medida de estas partes.

**Figura 15**

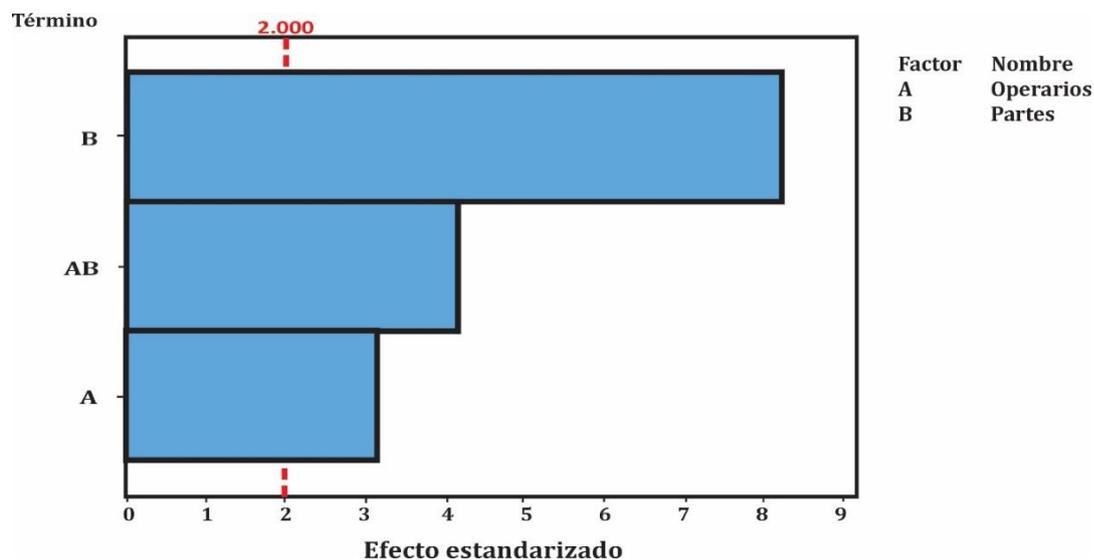
*Gráfica de efectos principales para los pesos*



La figura 15 muestra la variación en el peso promedio entre operarios es mínima, lo que sugiere un efecto insignificante del factor operarios. En contraste, las diferentes partes muestran una variación considerable en el peso promedio, indicando un efecto significativo del factor parte.

**Figura 16**

*Diagrama de Pareto de efectos estándares*



La Figura 16 nuestro el diagrama de Pareto es una herramienta gráfica que identifica y prioriza los factores con mayor impacto en la variable de respuesta pesos de la sal de maras, mostrando los efectos estandarizados de los factores y sus interacciones. La línea vertical roja 2.000 representa el umbral de significancia para  $\alpha=0.05$ , los factores o interacciones que se

extienden más allá de esta línea se consideran estadísticamente significativa. El factor parte A es el que más influye y es muy significativo, seguido de la interacción partes y operario AB, también significativa, mientras que el factor operario tiene menor influencia, aunque sigue siendo significativo.

**Tabla 17:**

*Componente de varianza.*

<b>Fuente</b>	<b>Var</b>	<b>% del total</b>	<b>EE de la var.</b>	<b>Valor Z</b>	<b>Valor p</b>
Operarios	0.000000	4.38%	0.000000	0.550913	0.291
Operarios*Partes	0.000000	30.24%	0.000000	2.055800	0.020
Error	0.000000	65.38%	0.000000	5.477178	0.000
Total	0.000000				

La tabla 17 muestra la variabilidad debida a los operarios es baja con porcentaje de variación 4.38% y  $p = 0.291$ , indicando poca diferencia en los resultados según el operario. Sin embargo, la interacción operarios por partes contribuye significativamente en el porcentaje de variabilidad total 30.24% y  $p=0.020$ . La mayor parte de la variabilidad se atribuye al error 65.38% y  $p=0.000 < 0.05$ , posiblemente por factores no identificados o variabilidad inherente a la medición.

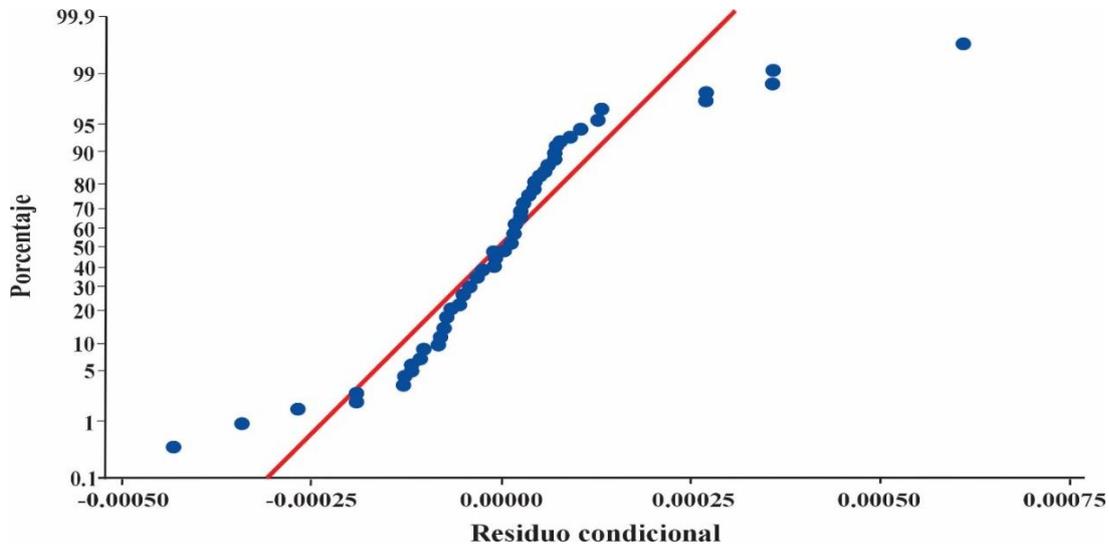
#### **4.2.2. Resultado del diseño factorial mixto con tres factores**

Se implementó un diseño factorial mixto que involucra tres factores. Dos de estos factores son los operarios y las partes, se agregó un tercer factor balanza, donde cada una de las 10 partes fue pesada tres veces por los tres operarios utilizando dos balanzas diferentes. Para analizar los resultados, se aplicó un modelo de análisis de varianza ANOVA.

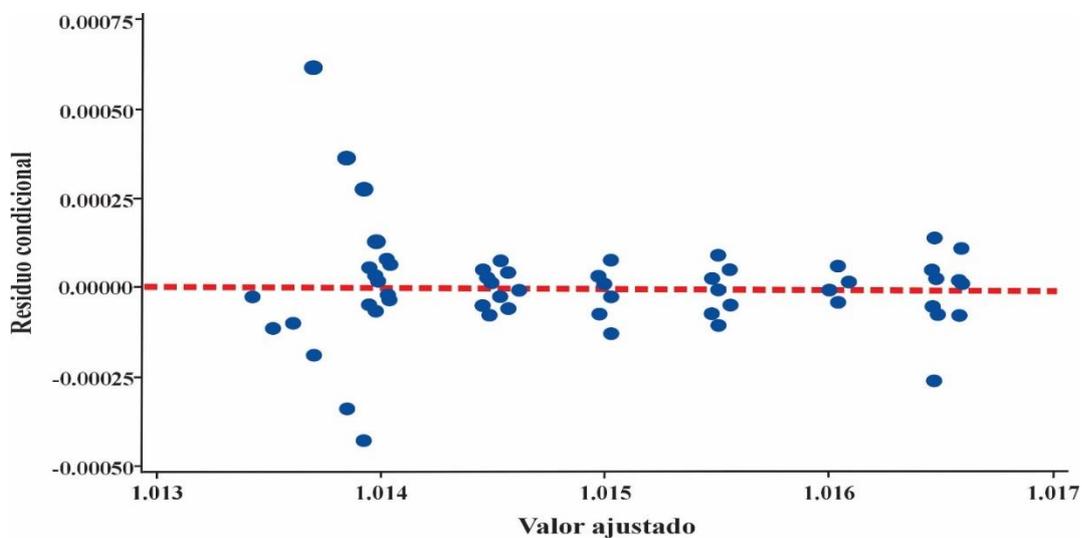
**Tabla 18:**

*Información de los factores*

<b>Factor</b>	<b>Tipo</b>	<b>Niveles</b>	<b>Valores</b>
Partes	Fijo	10	1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10
Operarios	Aleatorio	3	A; B; C
Balanza	Fijo	2	1; 2

**Figura 17***Supuesto de probabilidad normal*

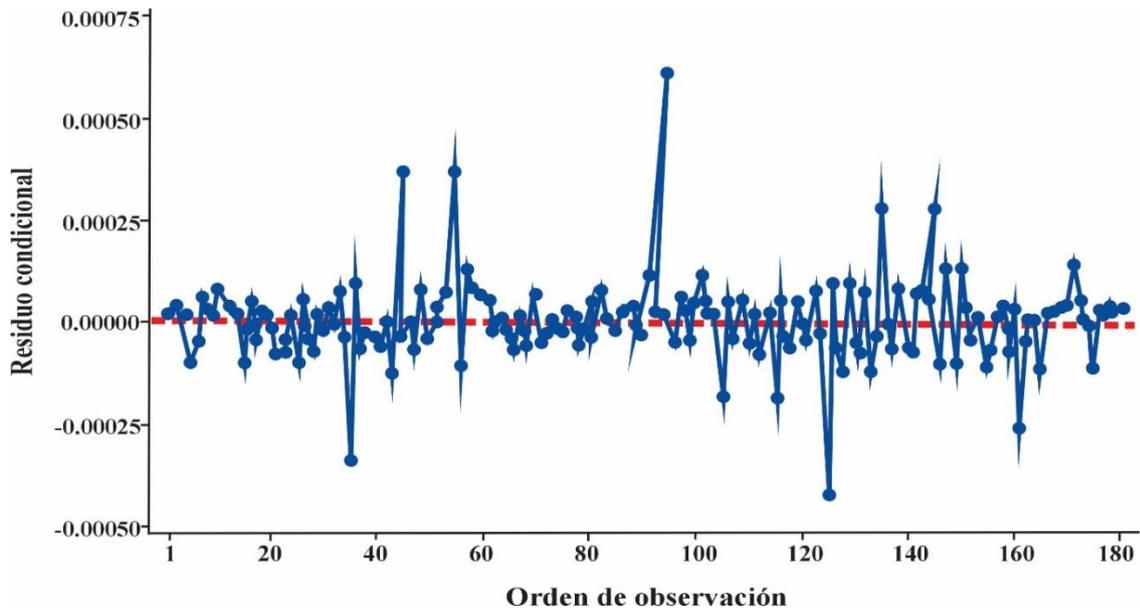
La Figura 17 sugiere que los pesos tienen una distribución aproximadamente normal, por que cumple razonablemente el supuesto de normalidad. La distribución de los residuos condicionales sigue en general la línea recta roja, indicando aproximación a la normalidad, aunque se observan ligeras desviaciones en los extremos, especialmente en la cola inferior izquierda y superior derecha.

**Figura 18***Supuesto de Varianza Constante*

El Figura 18 la dispersión de los residuos es mayor alrededor de valores ajustados de 1.014 y disminuye a medida que estos aumentan, mostrando un pequeño patrón de embudo abierto hacia la izquierda y evidenciando que, si hay homocedasticidad, los residuos del modelo tienen una dispersión uniforme.

### Figura 19

*Supuesto de independencia*



La Figura 19 muestra una dispersión relativamente aleatoria de los puntos alrededor de la línea de cero, sin tendencias, ciclos o agrupaciones evidentes, por tanto, el gráfico sugiere que no hay una autocorrelación fuerte, por lo que el supuesto de independencia cumple.

**Tabla 19:**

*Análisis de varianza ANOVA para tres factores mixtos de medidas de pesos de sal*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Partes	9	0.000150	0.000017	288.64	0.000
Operarios	2	0.000000	0.000000	1.86	0.187
Balanza	1	0.000000	0.000000	0.51	0.551
Partes*Operarios	18	0.000001	0.000000	10.50	0.000
Partes*Balanza	9	0.000002	0.000000	50.10	0.000
Operarios*Balanza	2	0.000000	0.000000	0.98	0.395
Partes*Operarios*Balanza	18	0.000000	0.000000	0.42	0.982
Error	120	0.000002	0.000000		
Total	179	0.000156			

#### **Resumen del modelo**

<b>S</b>	<b>R-cuadrado</b>	<b>R-cuadrado(ajustado)</b>	<b>R-cuadrado (pred)</b>
0.0001150	98.98%	98.48%	97.71%

La tabla 19 el factor parte influye estadísticamente significativamente en los pesos de sal con un  $p < 0.05$  y  $F = 288.64$ . Además, las interacciones partes operarios y partes balanza también son estadísticamente significativas. En cambio, los factores operarios y balanza significa que no hay evidencia suficiente para afirmar una relación significativa y las interacciones operarios balanza y operario balanza partes no existe diferencia significativa en la variabilidad de los pesos.

En el modelo,  $R^2 = 0,9898$  lo que indica que 98.98% de la variabilidad de los pesos es debido a los diferentes operarios, balanzas y a las diferentes partes. Según  $R^2$  ajustado el

98.48% de la variabilidad de los pesos es explicado por el modelo y  $R^2$  predictivo indica un alto poder predictivo en la variabilidad de los datos nuevos.

### Comparación por pares de Tukey: Partes por Balanza

**Tabla 20:**

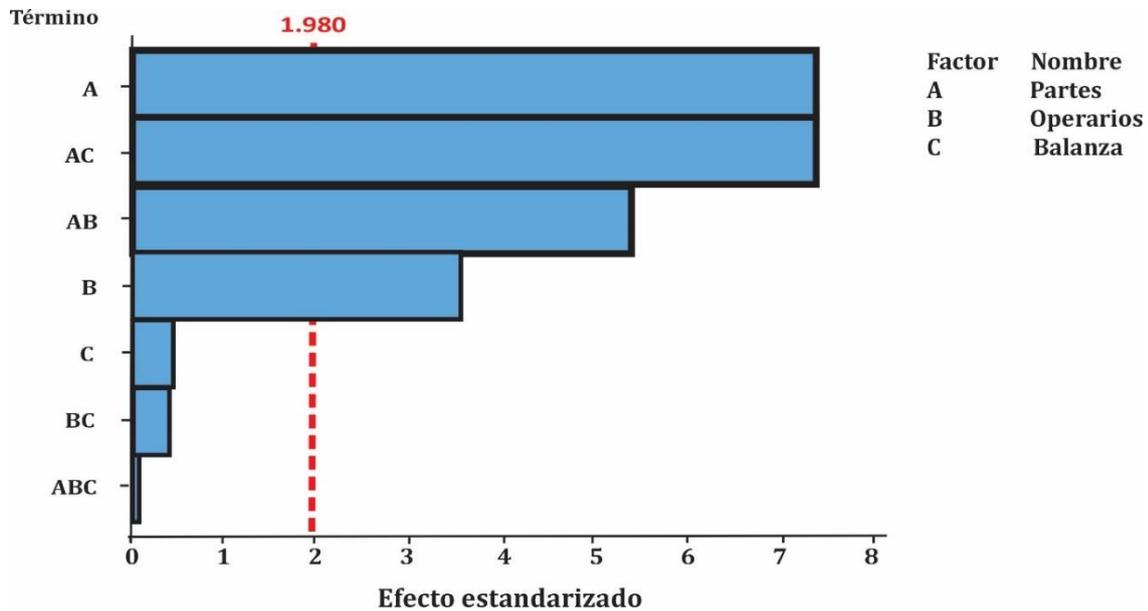
*Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%*

Partes*Balanza		Media	Agrupación
1	2	1.01651	A
1	1	1.01650	A
4	1	1.01604	B
4	2	1.01604	B
9	1	1.01604	B
9	2	1.01551	C
6	1	1.01551	C
6	2	1.01551	C
3	1	1.01500	D
3	2	1.01500	D
8	2	1.01499	D
2	1	1.01457	E
2	2	1.01449	E
8	1	1.01449	E
10	1	1.01403	F
10	2	1.01397	F G
7	1	1.01397	F G
7	2	1.01397	F G
5	2	1.01371	G H
5	1	1.01362	H

Tabla 20 muestra las combinaciones de partes y balanza se han dividido en grupos estadísticamente diferentes. Los grupos A y B tienen las medias más altas, mientras que los grupos F, G y H tienen las medias más bajas. Los grupos que no comparten letras son estadísticamente significativos.

**Figura 20**

*Diagrama de Pareto de efectos estandarizados*



La Figura 20 muestra el diagrama de Pareto de efectos estandarizados ayuda a identificar los factores más influyentes en los pesos, considerando partes, operarios, balanza y sus interacciones. La gráfica muestra los efectos significativos, indicando que solo el 20% de los factores son cruciales para optimizar el proceso.

El factor partes es el más influyente, con un impacto notable en el peso final del producto. La interacción entre partes y balanza AC también es significativa, indicando que ciertas combinaciones afectan más el peso. El factor operarios B tiene un impacto menor que las partes y su interacción con la balanza. Además, la interacción entre partes y operarios AB sugiere que la habilidad del operario influye en el peso. La balanza por sí sola tiene un efecto menor, aunque su interacción con las partes es importante, mientras que las interacciones de tres factores ABC son menos relevantes.

**Tabla 21:**  
*Componentes de la varianza, utilizando SC ajustado*

Fuente	% del total		
	de varianza	Desv.Est.	% del total
Operarios	3.63%	0.0000288	19.06%
Partes*Operarios	38.32%	0.0000934	61.90%
Operarios*Balanza	0.00%	0.0000000	0.00%
Partes*Operarios*Balanza	0.00%	0.0000000	0.00%
Error	58.05%	0.0001150	76.19%
Total		0.0001509	

En la tabla 21 el error experimental es la principal causa de variabilidad 58.05%, seguido de la interacción partes-operarios 38.32%. Los operarios contribuyen poco 3.63%, y la balanza no influye significativamente. La variabilidad se debe principalmente a factores aleatorios y la interacción partes-operarios, por lo que se sugiere minimizar estas fuentes para mejorar las mediciones.

### **4.3. Procesamiento, Análisis e Interpretación Resultados del Estudio de Repetibilidad & Reproducibilidad**

Este estudio utiliza el enfoque de repetibilidad y reproducibilidad R&R para analizar el sistema de medición del peso de la sal, combinando el análisis de rangos promedio y ANOVA. El análisis ANOVA es el método principal debido a su precisión y utilizaremos en esta investigación.

#### **4.3.1. Estudio R&R para analizar los pesos de sal utilizando la balanza 1**

Se evaluaron los resultados del análisis ANOVA de dos factores, que es más preciso al considerar tanto la variación de los operadores como su interacción con las partes.

**Formulación de hipótesis para comparar las medias entre las partes (efecto fijo).**

$H_0$  : Los pesos medios de las partes son iguales.

$H_a$  : Existe diferencias en los pesos medios de las partes.

**Formulación de hipótesis para comparar la variabilidad entre operarios (efecto aleatorio).**

$H_0$  : No existe variabilidad en las mediciones de peso atribuida a los operarios.

$H_a$  : La variabilidad en las mediciones de peso sí depende del operario.

**Hipótesis para evaluar la interacción entre partes y operarios.**

$H_0$  : No existe interacción significativa entre los operadores y las partes en las mediciones.

$H_a$  : Existe una interacción significativa entre los operadores y las partes en las mediciones.

**Tabla 22:**

*ANOVA de dos factores con interacción*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>MC</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Partes	9	0.0000813	0.0000090	294.940	0.000
Operarios	2	0.0000001	0.0000001	1.842	0.187
Partes * Operarios	18	0.0000006	0.0000000	3.582	0.000
Repetibilidad	60	0.0000005	0.0000000		
Total	89	0.0000825			

En la Tabla 22 muestra que se rechaza la hipótesis nula para las piezas y para la interacción entre operarios y piezas, dado que los p-valores son menores a 0.05, indicando diferencias en las mediciones y evidencia de interacción; en cambio, se acepta la hipótesis nula para los operarios, ya que el p-valor es mayor a 0.05, sugiriendo que no hay variabilidad significativa entre ellos.

Por consiguiente, es fundamental que el factor partes, ya que refleja la variación del proceso de producción, este factor debe ser la principal fuente de variación en un estudio R&R para asegurar la validez de la evaluación del sistema de medición. El factor operadores no influye significativamente en la variabilidad del sistema al medir el peso de la sal con la balanza 1. A pesar de esto, la interacción significativa entre operador y parte indica que los operadores miden diferentes partes de manera distinta.

**Tabla 23:**

*Componentes de variación y porcentaje de contribución de sal con balanza 1*

<b>Fuente</b>	<b>CompVar</b>	<b>%Contribución (de CompVar)</b>
Gage R&R total	0.00000002	1.65
Repetibilidad	0.00000001	0.84
Reproducibilidad	0.00000001	0.81
Operarios	0.00000000	0.08
Operarios*Partes	0.00000001	0.72
Parte a parte	0.00000100	98.35
Variación total	0.00000102	100.00

La tolerancia del proceso es = 0.004

Los resultados del estudio R&R presentados en la Tabla 23 que la variación entre las partes es la principal fuente de variabilidad, contribuyendo con un 98.35% a la variación total. Por otro lado, las contribuciones de repetibilidad y reproducibilidad son muy pequeñas, con un 0.84% y un 0.81%, respectivamente. Esto sugiere que el sistema de medición es efectivo para distinguir entre diferentes partes, ya que la mayor parte de la variabilidad se debe a las diferencias inherentes entre ellas, en consecuencia, los resultados del estudio sugieren que el sistema de medición es adecuado y permite identificar áreas de mejora, enfocándose en minimizar las fuentes de variabilidad menores.

**Tabla 24:***Porcentajes de variación de los sistemas de pesos de sal con balanza 1*

<b>Fuente</b>	<b>Desv.Est. (DE)</b>	<b>Var. estudio (6 × DE)</b>	<b>%Var.</b>	<b>%Tolerancia</b>
			<b>estudio (%VE)</b>	<b>(VE/Toler)</b>
Gage R&R total	0.0001295	0.0007772	12.84	19.43
Repetibilidad	0.0000925	0.0005550	9.17	13.87
Reproducibilidad	0.0000907	0.0005441	8.99	13.60
Operarios	0.0000293	0.0001760	2.91	4.40
Operarios*Partes	0.0000858	0.0005148	8.51	12.87
Parte a parte	0.0010004	0.0060023	99.17	150.06
Variación total	0.0010087	0.0060524	100.00	151.31

---

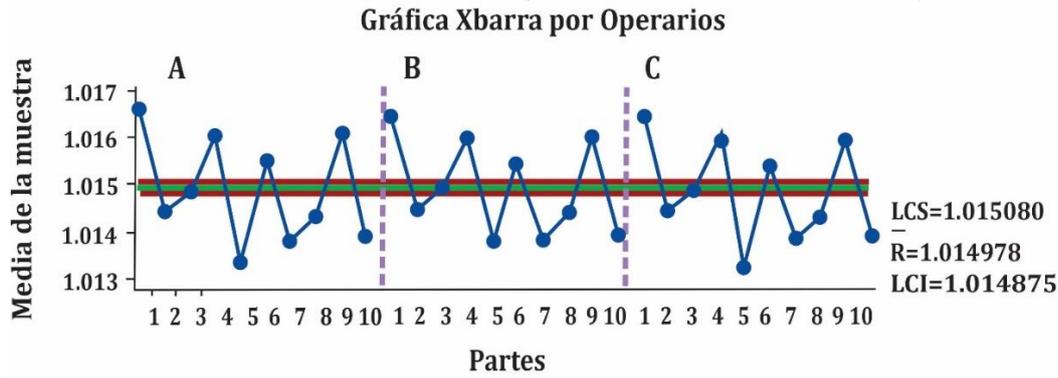
Número de categorías distintas = 10

En la Tabla 24, el porcentaje de variación del estudio revela que el sistema de medición aporta un 12.84% a la variación total del estudio, dado que este porcentaje cae dentro del rango de 10% a 30%, la variación del sistema se considera moderada y podría necesitar optimizaciones para aumentar la precisión, la mayor parte de la variación se debe a las diferencias entre las partes 99.17%. El porcentaje de tolerancia muestra que la variación del sistema de medición ocupa el 19.43% de la tolerancia total, siendo bueno. Sin embargo, la variación entre las partes es significativa, con un porcentaje de tolerancia del 150.06%, superando el 100%.

El índice de capacidad distinta (NDC) de 10 revela que el sistema de medición es preciso y permite diferenciar entre distintos valores con una gran fiabilidad.



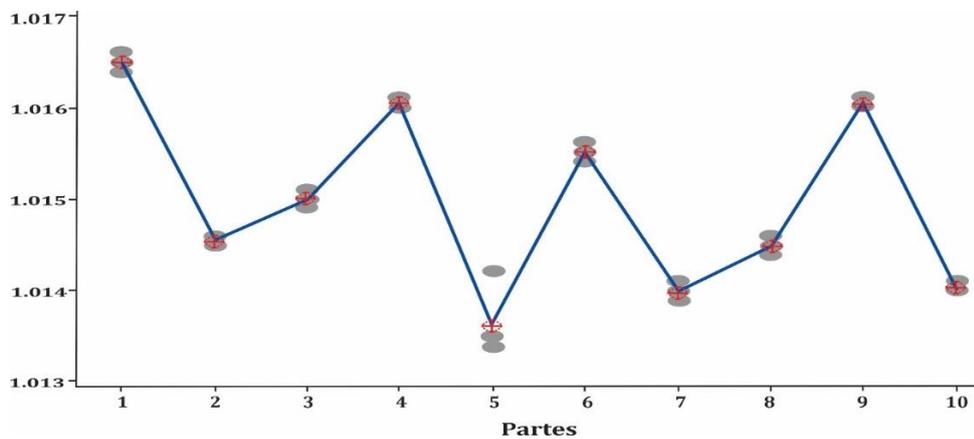




La Figura 23 demuestra que, mientras los operadores A y C realizan mediciones confiables (según la gráfica de rangos), el operador B introduce una variabilidad significativa, especialmente en la medición de la parte 5, lo que implica la necesidad de revisar su capacitación o el manejo del sistema de medición. Además, la gráfica de medias indica que la variabilidad entre las partes es el factor dominante de variación en el sistema, con la mayoría de los datos fuera de los límites de control.

#### Figura 24

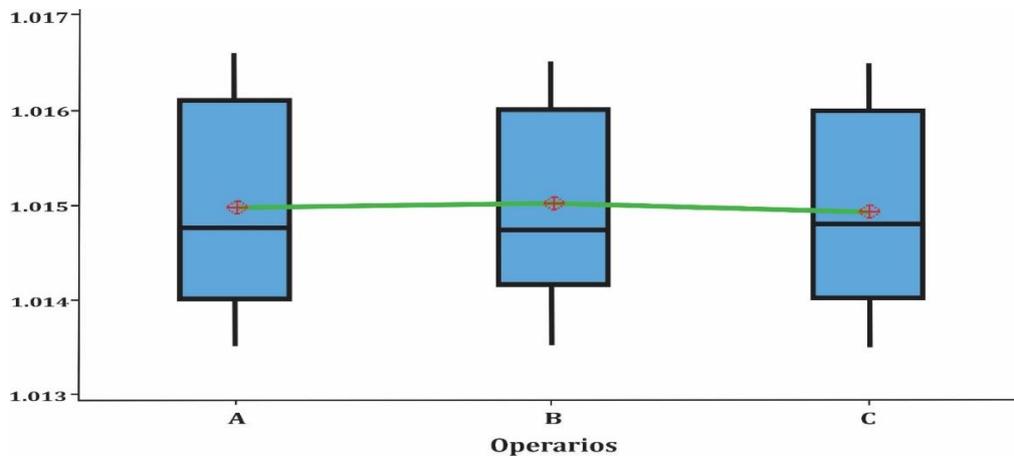
*Mediciones por número de partes en pesos de la sal con la balanza 1*



La Figura 24 muestra una variación significativa en las partes 1 y 5 con mediciones diferentes, mientras que la parte 5 se realizan las repetidas de diferente manera. Esto indica que el sistema de medición detecta diferencias entre partes, aunque presenta cierta variabilidad interna, sugiriendo margen de mejora en precisión y consistencia.

**Figura 25**

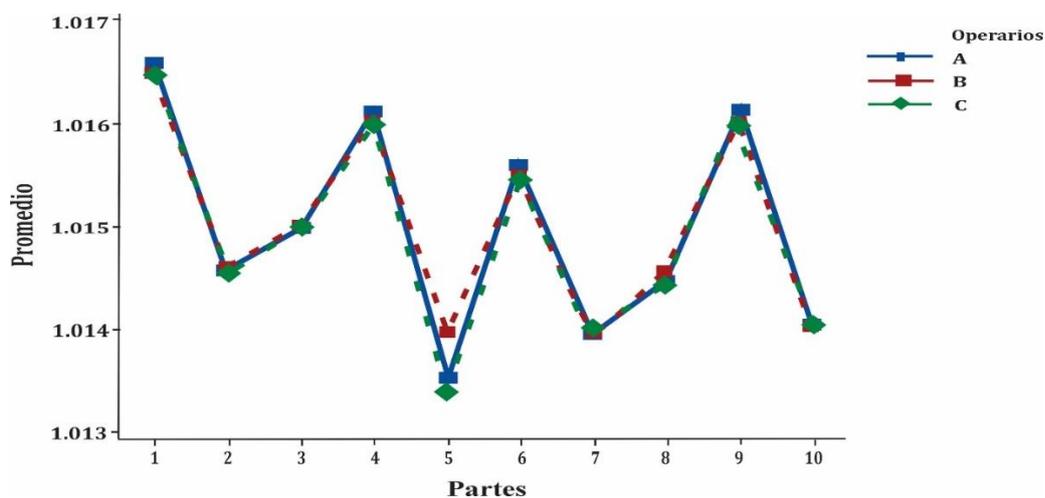
*Diagrama de cajas de sistema de pesos por operario*



En la figura 25 se puede observar que los círculos blancos representan los promedios de las mediciones hechas por los operarios, se puede observar también que los promedios de mediciones por los tres operarios son muy parecidos lo cual indica que la variación es muy baja y reproducibilidad aceptable.

**Figura 26**

*Gráfica de interacción entre los operarios y por número de partes*



En la figura 26 muestra la interacción partes y operarios, las líneas de los operadores A, B y C se mantienen cerca, mostrando buena consistencia. Sin embargo, se observan pequeñas diferencias en las partes 5 con lo que mide el peso el operario B.

### 4.3.2. Estudio R & R cruzado para los pesos de sal con balanza 2

El ANOVA de dos factores es un método preciso para evaluar la reproducibilidad, considerando la variación debida a los operadores y la interacción entre operadores y partes.

**Formulación de hipótesis para comparar las medias entre las partes con balanza 2 (efecto fijo).**

$H_0$  : Los pesos medios de las partes son iguales.

$H_a$  : Existe diferencias en los pesos medios de las partes.

**Formulación de hipótesis para comparar la variabilidad entre operarios con balanza 2 (efecto aleatorio).**

$H_0$  : No existe variabilidad en las mediciones de peso atribuida a los operarios.

$H_a$  : La variabilidad en las mediciones de peso sí depende del operario.

**Hipótesis para evaluar la interacción entre partes y operarios con balanza 2.**

$H_0$  : No existe interacción significativa entre los operadores y las partes en las mediciones.

$H_a$  : Existe una interacción significativa entre los operadores y las partes en las mediciones.

#### Tabla 25:

*ANOVA de dos factores con interacción con medidas de pesos de sal de 1000 gramos con balanza 2.*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>MC</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Partes	9	0.0000715	0.0000079	242.601	0.000
Operarios	2	0.0000001	0.0000001	1.720	0.207
Partes * Operarios	18	0.0000006	0.0000000	1.831	0.042
Repetibilidad	60	0.0000011	0.0000000		
Total	89	0.0000733			

En la tabla 25 el valor p es menor que 0,05, se rechaza la hipótesis  $H_0$  esto indica que hay una diferencia significativa entre los pesos de las partes, y el sistema de medición es

capaz de detectarla. En esta misma tabla con respecto a los operarios el valor p es 0.207, al ser mayor que 0.05, aceptamos la hipótesis  $H_0$  esto indica que no se encontraron variabilidad en la medida de los pesos entre operarios, lo que es positivo para el estudio R&R porque sugiere que el operador no influye en las mediciones. Y por último con respecto a la interacción de las partes y operarios el p-valor es 0.042, inferior a 0.05, se rechaza la hipótesis nula  $H_0$  esto revela una interacción significativa entre las partes y los operarios en las mediciones, lo que sugiere que los operadores podrían no estar utilizando el instrumento de medición de manera uniforme en todas las partes.

**Tabla 26:**

*Componentes de la varianza y porcentaje de contribución de pesos con balanza 2*

Fuente	%Contribución	
	CompVar (de CompVar)	
Gage R&R total	0.00000002	2.62
Repetibilidad	0.00000002	1.98
Reproducibilidad	0.00000001	0.64
Operarios	0.00000000	0.09
Operarios*Partes	0.00000000	0.55
Parte a parte	0.0000008792	97.38
Variación total	0.0000009029	100.00

En la tabla 26 el R&R total es 2.62%, lo que muestra que el sistema de medición es aceptable. La variación principal proviene de las diferencias entre partes con 97.38%, lo cual es favorable. La repetibilidad es satisfactoria con 1.98%, indicando consistencia del instrumento, y la reproducibilidad también es buena con 0.64%, lo que refleja la consistencia de los operarios. Además, las variaciones entre operarios y la interacción operario y parte son muy bajas, lo que confirma la consistencia de los operarios.

Cuando mayor sea % contribución R&R, mayores será los problemas sobre el sistema de medición. General Motors Corporation (AIAG, 2010) indica, menos del 1% el sistema de medición es aceptable, entre 1% y 9%: el sistema de medición es aceptable según la aplicación y más del 9%: el sistema de medición es inaceptable y debe mejorarse. En nuestro estudio de investigación el sistema de medición del % contribución es 2.62% entonces el sistema es aceptable.

**Tabla 27:**

*Evaluación del sistema de medición de porcentaje de variación de pesos con balanza 2.*

Fuente	Desv.Est. (DE)	Var. estudio (6 × DE)	%Var.	
			estudio (%VE)	%Tolerancia (VE/Toler)
Gage R&R total	0.0001537	0.0009223	16.18	23.06
Repetibilidad	0.0001337	0.0008025	14.08	20.06
Reproducibilidad	0.0000758	0.0004546	7.97	11.37
Operarios	0.0000280	0.0001682	2.95	4.21
Operarios*Partes	0.0000704	0.0004223	7.41	10.56
Parte a parte	0.0009377	0.0056261	98.68	140.65
Variación total	0.0009502	0.0057012	100.00	142.53

Número de categorías distintas = 8

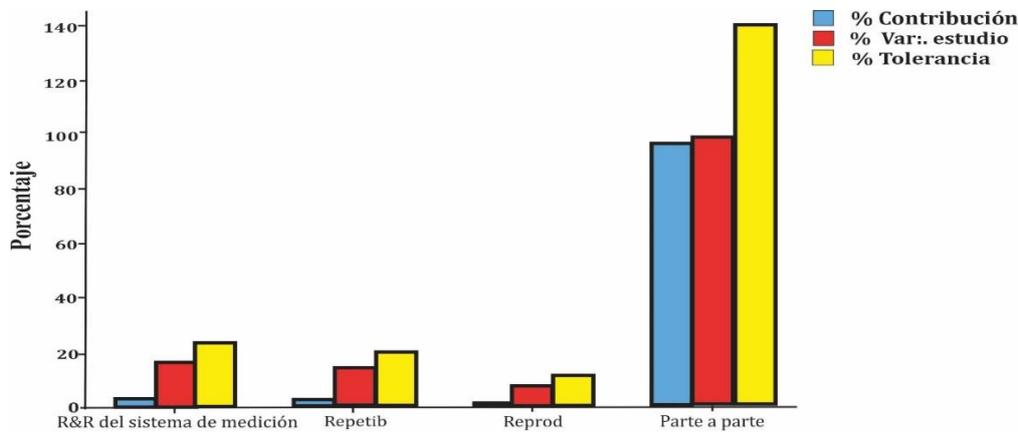
El estudio R&R muestra el porcentaje de variación de estudio del 16.18%, indicando que el sistema de medición es aceptable, aunque está cerca del límite superior. La repetibilidad fue 14,08% y reproducibilidad es 7,97% son aceptables. Sin embargo, la variabilidad entre partes es alta con 98,68%, reflejando grandes diferencias entre ellas. En cuanto al porcentaje de variación de la tolerancia el R&R es del 23,06%, aceptable pero mejorable. La tolerancia de parte a parte es del 140,65%, lo que revela un problema crítico de alta variación que requiere atención inmediata.

El resultado de 8 en el Número de Categorías Distintas (NDC) indica que el sistema de medición utilizado para pesar la sal posee una capacidad aceptable. Esto significa que el



**Figura 28**

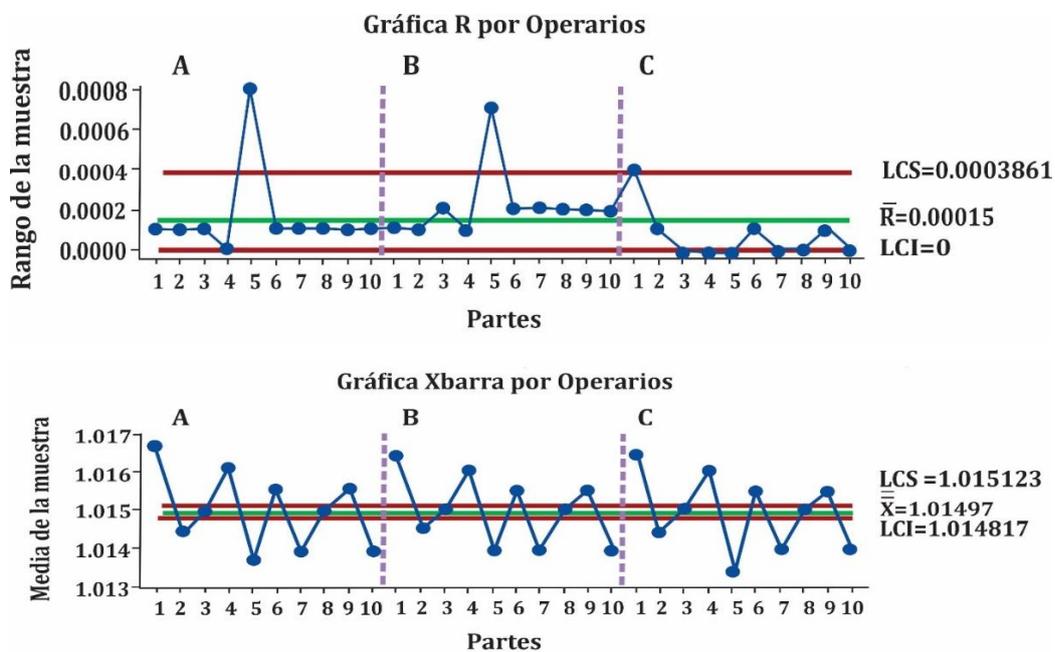
*Componentes de variación de R&R en pesos de sal con balanza 2*



En la Figura 28 nuestras las componentes de variación, la variación entre las partes es la principal fuente de variación, mientras que la repetibilidad y la reproducibilidad son mínimas. Esto sugiere que el sistema de medición es efectivo.

**Figura 29**

*Gráfica de rangos y medias por operario para los pesos de sal con balanza 2*

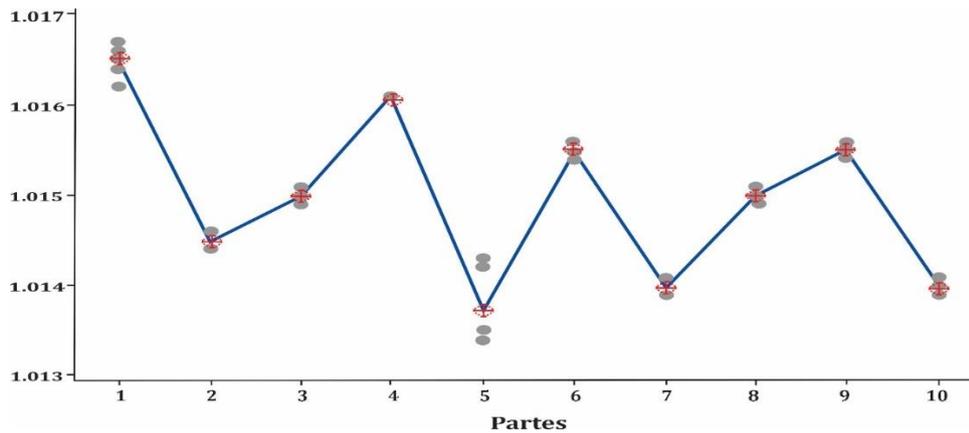


El gráfico de rangos R figura 29 revela que el operador C obtiene mediciones confiables, mientras que los operadores A y B presentan una variabilidad considerable, especialmente al medir la parte 5. Esto sugiere la necesidad de evaluar su capacitación o el

uso del sistema de medición. En la gráfica de medias la cantidad de puntos se encuentran fuera de los límites de control evidencia que la variación entre partes supera la variación del dispositivo de medición.

**Figura 30**

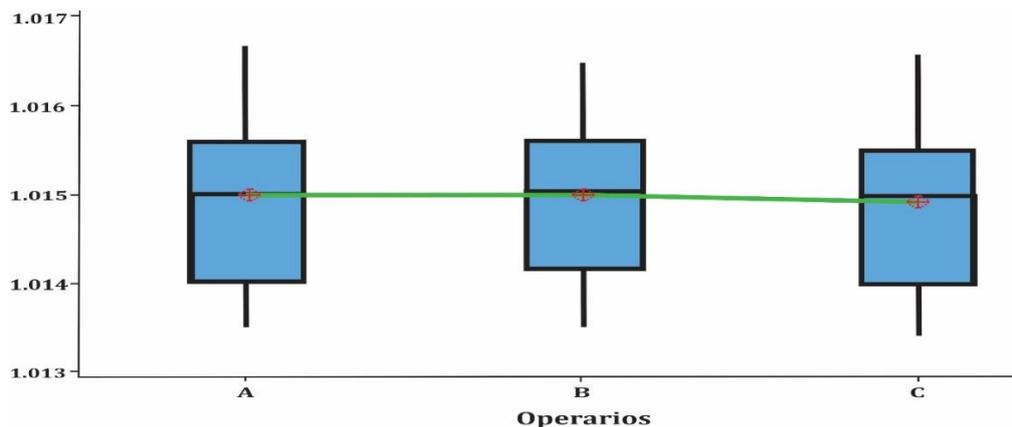
*Mediciones por número de partes en pesos de la sal con la balanza 2*



La Figura 30 ilustra una variación significativa entre las partes, principalmente en las partes 1 y 5, así como cierta variabilidad en las mediciones repetidas de estas partes, el análisis ANOVA resulta crucial para determinar la capacidad del sistema de medición.

**Figura 31**

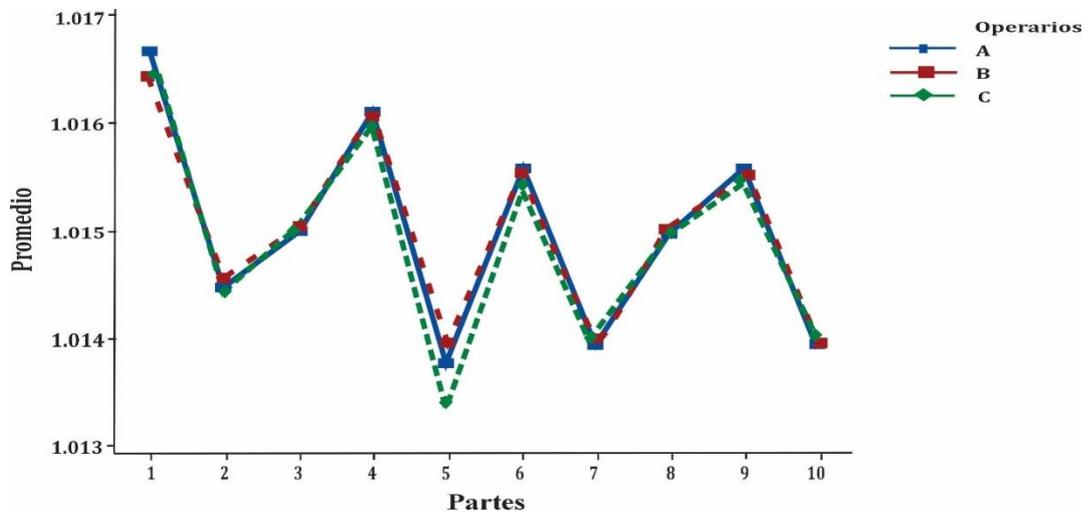
*Diagrama de cajas de sistema de pesos por operario*



En el diagrama de cajas se observa que tienen un tamaño y posición similares, lo que sugiere que no existen diferencias significativas en los promedios de las medidas de los pesos de la sal entre los operarios, indica que el sistema presenta una buena reproducibilidad.

**Figura 32**

*Gráfica de interacción entre los operarios y por número de partes*



La figura 32 de interacción entre partes y operadores muestra patrones similares en las líneas, en la parte 5 los operarios están midiendo el peso de manera diferente lo que indica que no hay una interacción significativa entre los operadores y las parte. Esto revela que los operadores realizan las mediciones de forma coherente, con una pequeña variación observada en la parte 5.

#### **4.3.3. Estudio R & R sistemas de medición Expandido con los tres factores**

Según Automotive Industry Action Group (AIAG, 2019) el estudio R&R expandido amplía los estudios tradicionales de repetibilidad y reproducibilidad, analizando detalladamente los sistemas de medición y considerando tres factores como interacciones entre operadores, balanzas y partes.

#### **Estudio R&R del sistema de medición: Pesos versus Partes; Operarios; Balanza**

**Tabla 28:**

*Información de los factores*

<b>Factor</b>	<b>Tipo</b>	<b>Niveles</b>	<b>Valores</b>
Partes	Fijo	10	1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10
Operarios	Aleatorio	3	A; B; C
Balanza	Fijo	2	1; 2

En la tabla 28 indica que las partes representa 10 niveles, es decir, 10 categorías o unidades distintas numeradas del 1 al 10. Este factor es fijo, lo que significa que las partes específicas seleccionadas son de interés particular y los resultados se limitan a ellas.

Operarios: Este factor tiene 3 niveles (A, B y C) y es de tipo aleatorio, lo que indica que los operarios seleccionados representan una muestra de una población más amplia, y los resultados se generalizan a dicha población.

Balanza: Hay 2 niveles (1 y 2) y es un factor fijo, por lo que se examinan esas dos balanzas en específico, sin intención de extrapolar a otras.

La combinación de estos factores será utilizada en un diseño experimental para evaluar su efecto conjunto sobre alguna variable de respuesta, como en un estudio de medición o control de calidad.

**Tabla 29:**

*ANOVA con Todos los Términos en Sistemas de Pesos.*

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor	
					F	Valor p
Partes	9	0.00015037	0.0001503	0.0000168	288.64	0.000
Operarios	2	0.00000021	0.0000002	0.0000001	1.86	0.187
Balanza	1	0.00000000	0.0000000	0.0000000	0.51	0.551
Partes*Operarios	18	0.00000104	0.0000010	0.0000001	10.50	0.000
Partes*Balanza	9	0.00000249	0.0000025	0.0000003	50.10	0.000
Operarios*Balanza	2	0.00000001	0.0000000	0.0000001	0.98	0.395
Partes*Operarios*Balanza	18	0.00000010	0.0000001	0.	0.42	0.982
Repetibilidad	120	0.00000159	0.0000016	0.00000001		
Total	179	0.00015581				00000001

$\alpha$  para eliminar el término de interacción = 0.05

En la tabla 29 los análisis de los factores principales revelan que las partes tienen un efecto altamente significativo en la variabilidad del sistema de medición, con un valor de F de 288.64 y  $p = 0.000 < 0.05$ , mientras que las diferencias entre operadores no son relevantes,

dado que el resultado es  $F = 1,86$  y  $p = 0,187 > 0,05$ . Asimismo, las balanzas no contribuyen significativamente a la variabilidad, como lo indica  $F = 0,51$  y  $p = 0,551 > 0,05$ . En cuanto a las interacciones, se observa que la interacción entre partes y operarios es significativa  $F = 10,50$ ,  $p = 0,000 < 0,05$ , lo que sugiere que el efecto de las partes varía según el operario que realiza la medición; de igual manera, la interacción entre partes y balanzas también es significativa  $F = 50,10$ ,  $p = 0,00 < 0,05$ . Sin embargo, la interacción entre operadores y balanzas  $F = 0,98$ ,  $p = 0,395 > 0,05$  y la interacción triple entre partes, operarios y balanzas  $F = 0,42$ ,  $p = 0,982 > 0,05$  no son significativas, lo que indica que no hay un efecto combinado relevantes entre estos factores. Finalmente, la repetibilidad muestra una suma de cuadrados pequeños, lo cual sugiere que el sistema de medición es exacto y fiable.

Los factores relacionados con las partes, así como las interacciones entre partes operadores y partes balanzas son los principales generadores de la variabilidad observada, en contraste, los factores de operadores y balanzas no presentan interacciones importantes. Además, el sistema demuestra una buena repetibilidad, dado que la variabilidad no explicada (error) es baja. En este caso, si el valor  $p$  es mayor de 0.05, minitab excluye el término de interacción del modelo y desarrolla una segunda tabla de ANOVA.

**Tabla 30:**

*ANOVA con los Términos Aplicado para los Cálculos de R&R del Sistema de Pesos.*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Sec.</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Partes	9	0.0001504	0.0001504	0.0000167	288.64	0.00
Operarios	2	0.0000002	0.0000002	0.0000001	1.86	0.19
Balanza	1	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.22	0.64
Partes*Operarios	18	0.0000010	0.0000010	0.0000001	4.78	0.00
Partes*Balanza	9	0.0000025	0.0000025	0.0000003	22.79	0.00
Repetibilidad	140	0.0000017	0.0000017	0.0000000		
Total	179	0.0001558				

De la tabla 30 la variabilidad entre las partes es significativamente el más relevante dado que  $p < 0.05$ , seguida por las interacciones entre partes operadores, así como entre partes balanzas con un valor de  $p < 0.05$ . Por otro lado, ni los operadores ni la balanza producen variaciones significativas dado que el valor de  $p > 0.05$ . Aunque la repetibilidad es aceptable, es importante tener en cuenta el efecto de las interacciones en el sistema de medición.

**Tabla 31:**

*Componentes de variación*

<b>Fuente</b>	<b>CompVar</b>	<b>%Contribución (de CompVar)</b>
Gage R&R total	0.00000003	3.95
Repetibilidad	0.00000001	1.39
Reproducibilidad	0.00000002	2.56
Operarios	0.00000000	0.09
Balanza	0.00000000	0.00
Partes*Operarios	0.00000001	0.88
Partes*Balanza	0.00000001	1.59
Parte a parte	0.00000084	96.05
Partes	0.00000084	96.05
Variación total	0.00000087	100.00

En la tabla 31 el componente parte representa de manera abrumadora el mayor porcentaje de contribución a la variación total, equivaliendo a un 96.05%, lo que indica que las diferencias entre las partes utilizadas en el proceso son la principal fuente de variabilidad en los resultados, esto destaca la necesidad de mejorar la calidad y consistencia de las piezas empleadas para lograr una reducción significativa en la variación total. Las otras fuentes de variación, como la repetibilidad, reproducibilidad, operarios y balanza, aportan muy poco en la contribución de variabilidad con el 4%, no son las principales causas de variación, es

importante no ignorarlas, ya que mejorar en estas áreas podría resultar en reducciones marginales de la variación total.

**Tabla 32:**

*Evaluación del sistema de medición porcentaje de variación*

Fuente	Desv.Est. (DE)	Var. estudio (6 × DE)	%Var.	
			estudio (%VE)	%Tolerancia (VE/Toler)
Gage R&R total	0.0001855	0.0011128	19.89	27.82
Repetibilidad	0.0001101	0.0006605	11.80	16.51
Reproducibilidad	0.0001493	0.0008955	16.00	22.39
Operarios	0.0000287	0.0001723	3.08	4.31
Balanza	0.0000039	0.0000233	0.42	0.58
Partes*Operarios	0.0000873	0.0005240	9.36	13.10
Partes*Balanza	0.0001175	0.0007051	12.60	17.63
Parte a parte	0.0009140	0.0054839	98.00	137.10
Partes	0.0009140	0.0054839	98.00	137.10
Variación total	0.0009326	0.0055957	100.00	139.89

Número de categorías distintas = 6

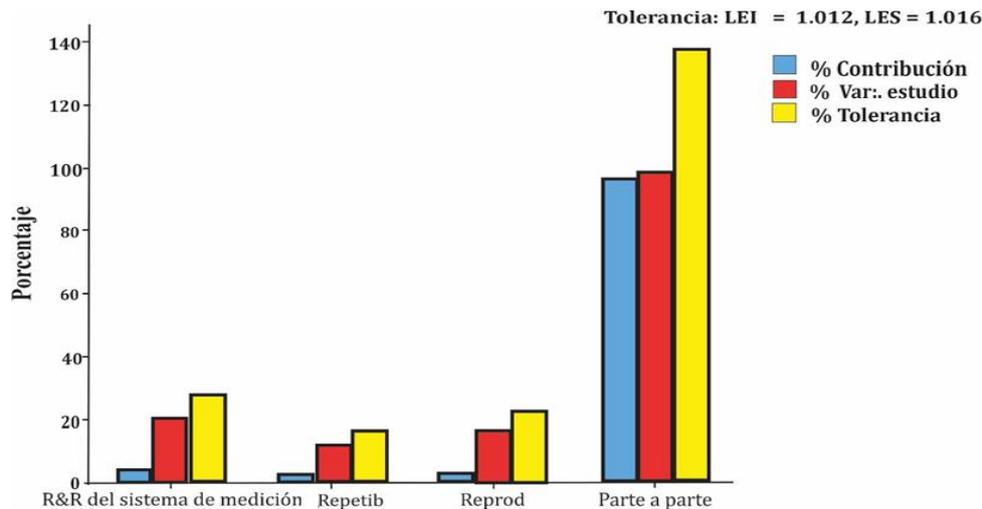
En la tabla 32 la componente parte representa el mayor porcentaje de la variación total, alcanzando un 98%, lo cual señala que las diferencias entre las partes medidas son la fuente principal de variabilidad. El sistema de medida R&R total representa un 19.89% de la variación, lo que revela que el sistema de medición tiene un impacto significativo y aceptable en la variabilidad. Esto requiere revisar la calibración de los equipos, la capacitación de los operadores y la precisión de los métodos de medición.

El %Tolerancia en un estudio R&R compara la variación del sistema de medición con la tolerancia del proceso, el R&R total fue 27.82% de tolerancia, lo que revela que la variación del sistema es relativamente alta. Las partes representan el 137.10% de la tolerancia, lo que confirma que la variación entre partes es la principal fuente de variación.

El sistema de medición de nuestro trabajo puede distinguir el número de categorías distinta de 6 niveles, lo que indica una precisión aceptable, pero con margen de mejora. La mayor variabilidad se encuentra en las partes, por lo que optimizar su calidad es clave para aumentar la confiabilidad de los resultados.

**Figura 33**

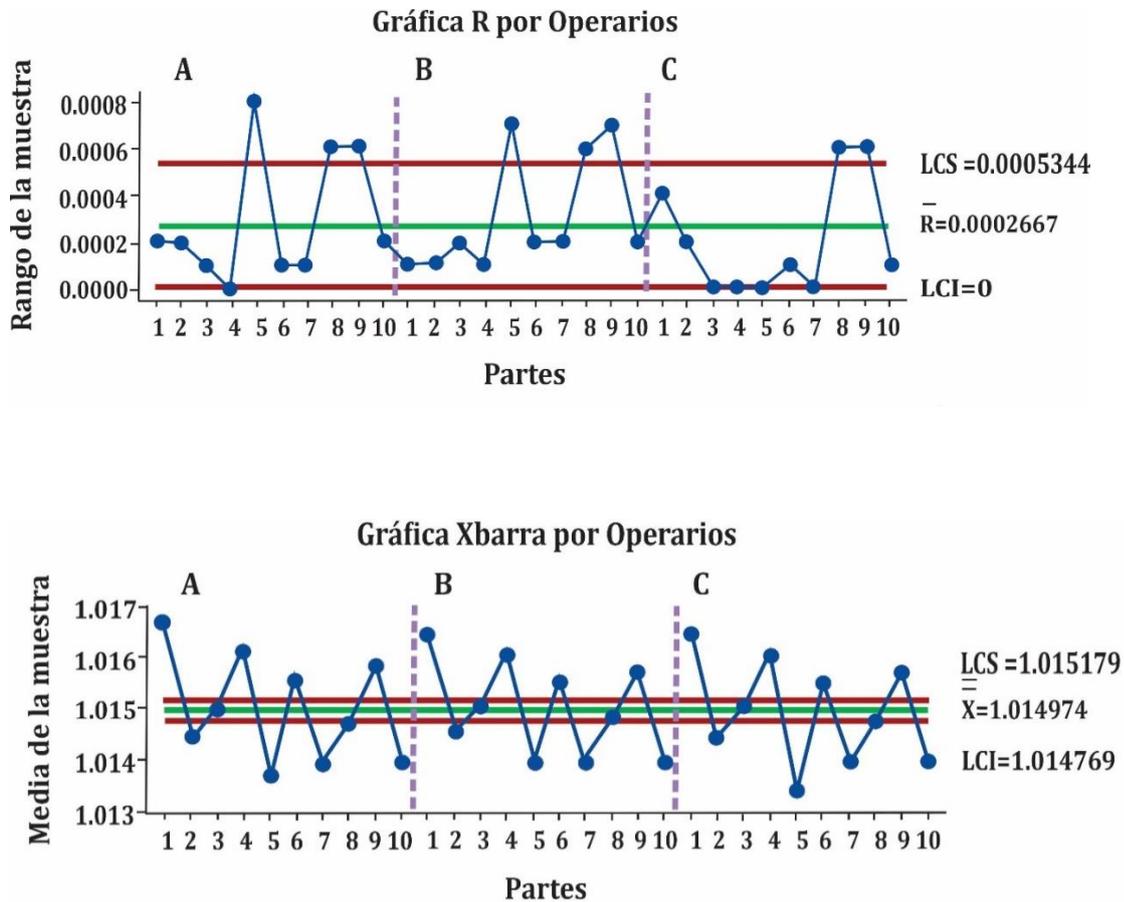
*Componentes de variación en sistemas de pesos R&R expandido*



La figura 33 descompone la variabilidad en el proceso de pesaje en diferentes fuentes de error. Cada barra muestra qué tanto contribuye cada fuente (como las características de las piezas o el equipo de medición) a la variación total, expresado en distintos porcentajes. El sistema de medición también contribuye de manera significativa a la variabilidad. Para mejorar la precisión y reducir la incertidumbre en las mediciones, es necesario abordar tanto la variabilidad de las partes como las deficiencias del sistema de medición.

**Figura 34**

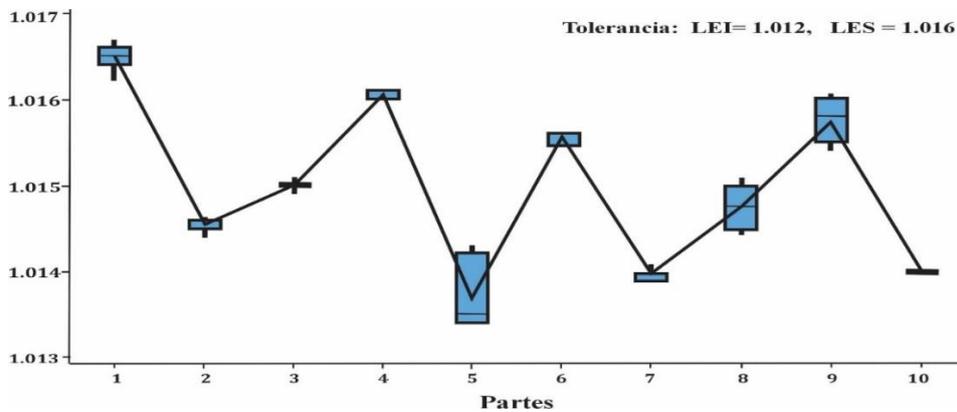
*Gráficas de control de rangos y medias por operario en sistemas de pesos expandida*



La figura 34 gráfica R se observa que existe una variabilidad moderada entre los tres operadores, ya que algunos puntos superan ligeramente el límite de control superior. Sin embargo, en general, la variabilidad entre operadores no parece ser el principal problema. La gráfica X barra revela variaciones en las medias según el operario; A tiende a tener medias más altas y C más bajas, este gráfico por operarios resalta la importancia de la reproducibilidad y repetibilidad en la variación del sistema de medición.

**Figura 35**

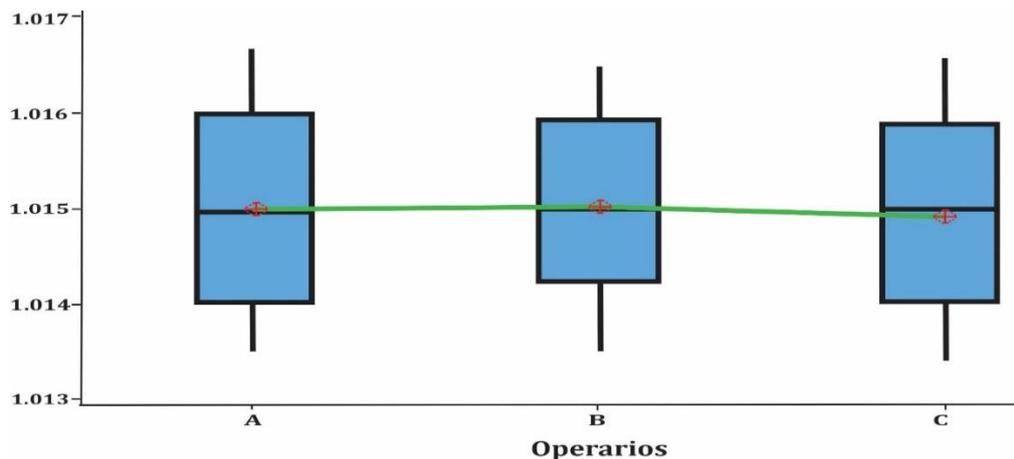
*Sistemas de mediciones expandidas por número de partes*



La figura 35 de número de partes proporciona una visión general de la variabilidad en los pesos de las partes. Los resultados indican que existe una necesidad de investigar las causas de esta variabilidad y tomar medidas correctivas para mejorar la consistencia del producto, la principal conclusión es que existe una variabilidad significativa en los pesos de las diferentes partes. Esto puede deberse a diversos factores, como diferencias en el material, el proceso de fabricación o las condiciones de medición.

**Figura 36**

*Diagrama de cajas de sistema de pesos expandidas por operario*

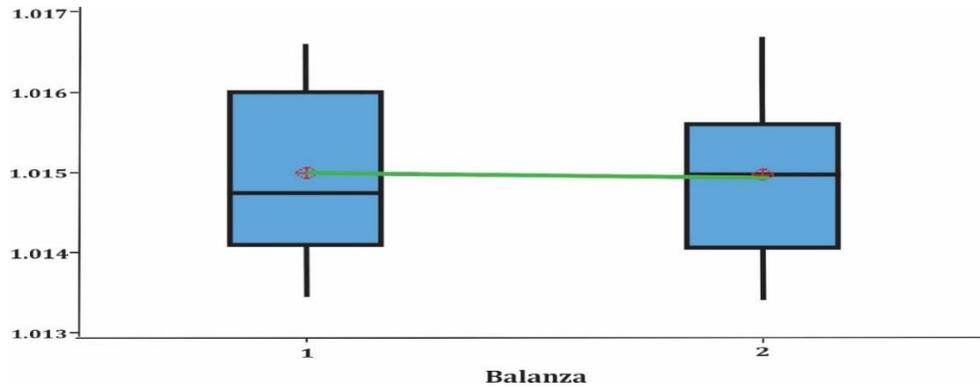


En la figura 36 de cajas los operadores señalan una variabilidad similar en la medida de los pesos, lo que apunta a una precisión comparable entre A, B y C, la falta de valores atípicos sugiere mediciones consistentes y sin errores extremos. Sin embargo, para obtener

una evaluación más completa, es recomendable realizar un análisis más profundo de los datos y considerar otros factores que afecten la calidad de las mediciones.

### Figura 37

*Diagrama de cajas de sistema de pesos expandidas por balanza*



En la figura 37 las dos balanzas parecen estar funcionando de manera similar, sin que haya una balanza que se destaque por tener una mayor variabilidad o un sesgo en sus mediciones. La ausencia de valores atípicos y la baja variabilidad entre las balanzas indican que no hay problemas graves en el proceso de medición que requieran una atención inmediata.

### Figura 38

*Gráfica de interacción en sistemas de pesos expandida entre parte y operario*

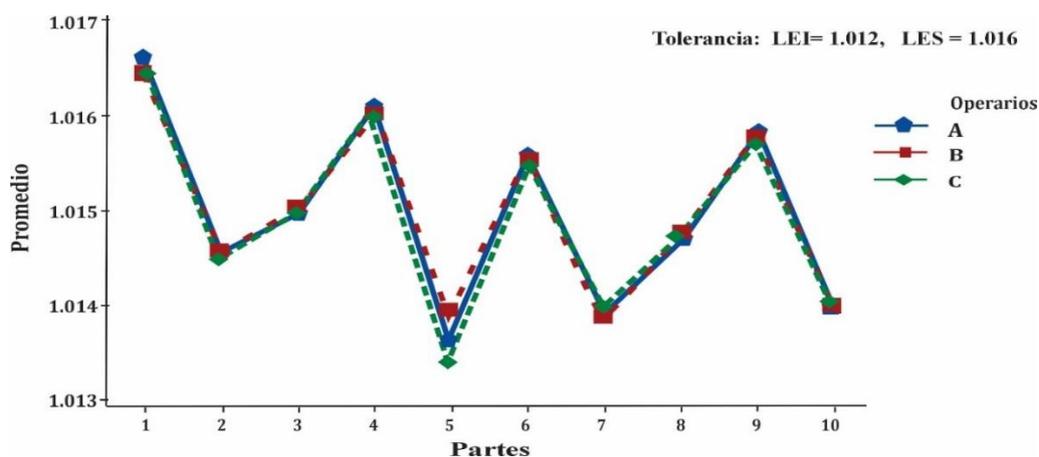
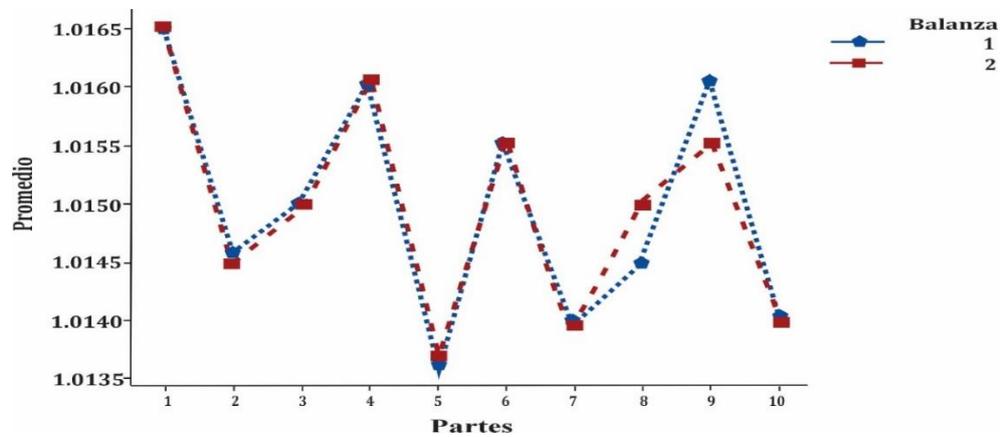


Figura 38 muestra que existe una interacción significativa entre las partes y los operadores en el proceso de medición, la variabilidad en las mediciones resulta de la combinación de diferencias entre partes y entre operadores.

**Figura 39**

*Gráfica de interacción en sistemas de pesos expandida entre las balanzas y partes*



La Figura 39 muestra que el peso medido depende tanto de la parte como de la balanza. Las líneas no paralelas indican una fuerte interacción: el desempeño relativo de cada balanza varía según la parte, sin que una sea consistentemente mejor.

**Figura 40**

*Gráfica de interacción en sistemas de pesos expandida entre operador y balanza.*

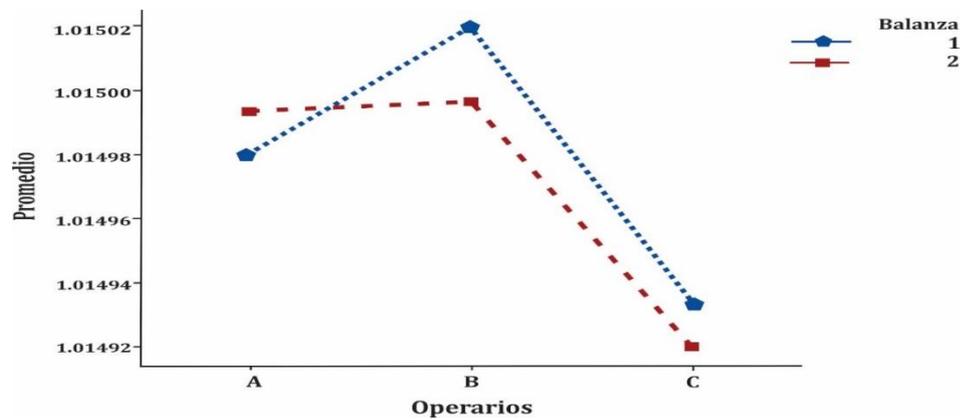


Figura 40 revela que existe una interacción significativa entre estos dos factores operarios y balanzas, lo que significa que la balanza afecta las mediciones de manera diferente según el operario. El operario B tiene mediciones más altas con la balanza 1, mientras que el operario C muestra mediciones similares con ambas balanzas y el operario A muestra una menor variación entre las balanzas.

## DISCUSIÓN

Con el propósito de establecer los índices de repetibilidad y reproducibilidad entre los distintos operadores en los sistemas de medición de la Sal de Maras en 2023, se obtuvo un valor  $p$  de 0.187 para el factor operadores, el cual es mayor que 0.05, lo que indica que este factor no afecta la variabilidad del sistema de medición al pesar la sal con la balanza 1. Además, se registró un 0.81% de variación en la reproducibilidad y un 13.60% de la variación total del estudio, determinándose que el sistema de medición es adecuado. Estos resultados reflejan una buena estabilidad en las mediciones realizadas por diferentes operadores, lo que implica que los esfuerzos de mejora pueden enfocarse en otros aspectos del proceso de medición. El porcentaje de variación en reproducibilidad indica que las discrepancias entre las mediciones realizadas por diferentes operadores son mínimas, mientras que el porcentaje de variación del estudio representa la variabilidad total observada en todas las mediciones. Estos hallazgos son respaldados por Reyes (2019), quien reportó un valor  $p$  menor a 0.05 en su investigación, donde el porcentaje de variación total fue del 8.04%, considerándose también aceptable. Asimismo, Benites (2023) determinó que su porcentaje de variación total respecto a la reproducibilidad fue del 1.1754%, lo cual es relativamente bajo. En términos generales, una baja variación en reproducibilidad es deseable, ya que indica que las mediciones son confiables y pueden ser replicadas por diversos operadores o en diferentes condiciones. Al comparar ambos porcentajes con los resultados de nuestro estudio, la baja variación de reproducibilidad sugiere que el sistema es consistente entre diferentes operadores.

La investigación evaluó la eficacia del sistema de medición de la Sal de Maras considerando tres factores: operarios, balanzas y partes, con enfoque en la repetibilidad y reproducibilidad. Los resultados muestran un porcentaje de contribución del 3.95%, considerado aceptable al estar dentro del rango del 1% al 9%, lo que indica que el sistema de

medición es consistente y confiable en múltiples pruebas. Además, el porcentaje de variación del estudio fue del 19.89%, también aceptable al situarse entre el 10% y el 30%. Sin embargo, el porcentaje de tolerancia fue del 27.82%, clasificado como marginalmente aceptable, ya que está entre el 20% y el 30%. Si bien el sistema es generalmente aceptable, existen áreas que requieren mejoras para optimizar la precisión y confiabilidad de las mediciones. Identificar los porcentajes de tolerancia permite detectar fuentes de variación y evaluar el riesgo de productos no conformes. Estos hallazgos coinciden con investigaciones previas, como la de Gómez (2010), quien reportó un porcentaje de contribución del 6.36%, aunque su porcentaje de variación fue inaceptable al alcanzar el 35.2%. Asimismo, Yep Leung (2011) encontró una variación del sistema de medición del 5.6%, con un estudio de variación del 23.6%, lo que indica niveles aceptables en comparación con los estándares establecidos.

El estudio destaca cómo las gráficas de control de calidad ayudan a analizar la repetibilidad y reproducibilidad en los sistemas de medición de la Sal de Maras, identificando fuentes de variabilidad. Los resultados obtenidos confirman que estas gráficas son fundamentales para garantizar la confiabilidad del sistema de medición. En la Figura 31 se observa que la variabilidad parte a parte tiene el mayor porcentaje de contribución en % de variación del estudio y % de tolerancia. La Figura 32 muestra una variabilidad moderada entre los operadores A y B en la gráfica de rangos; sin embargo, no se detectan sesgos en la gráfica de medias, lo que evidencia uniformidad en las mediciones realizadas por los operarios. En la Figura 33, la variabilidad es significativa entre los pesos de las diferentes partes (productos), lo que sugiere la influencia de factores externos o del propio sistema de medición. Los diagramas de cajas de la Figura 34 indican que no hay valores atípicos y que los operarios tienen un buen nivel de precisión. Las Figuras 36 y 37 revelan interacciones significativas entre operarios, partes y balanzas, lo que demuestra que las características de

los productos y el desempeño humano son factores clave en la variabilidad total, requiriendo un enfoque integral para mejorar el sistema. Al comparar estos hallazgos con estudios previos de Mallqui (2018) y Urquizo & Torres (2023), se evidencia consistencia en que la variabilidad principal proviene de la componente de las partes. Mallqui (2018) destaca que la mayor variación corresponde a esta componente y que las gráficas R y de interacción están dentro de límites aceptables. Urquizo & Torres (2023) identifican que, aunque la gráfica de partes muestra diferencias, la gráfica de interacción entre partes y operadores se mantiene dentro del rango esperado. Nuestro estudio se diferencia por abarcar un análisis R&R expandido, mientras que los estudios mencionados se enfocaron en análisis de diseño cruzado y tradicional.

El estudio buscó definir patrones de control de calidad para evaluar la repetibilidad y reproducibilidad en la medición del peso de la Sal de Maras. En este contexto, se analizó la teoría del número de categorías distintas, propuesta por General Motors Corporation (AIAG, 2010), la cual establece que dicho número debe ser igual o mayor a 5 para garantizar la confiabilidad y utilidad del sistema de medición en un entorno de control de calidad. Los hallazgos de esta investigación indican que, en la medición de los pesos de la sal utilizando la balanza 1, el sistema cumple con este criterio, lo que demuestra su capacidad. Además, al expandir el análisis para incluir operarios, partes y balanzas, los resultados confirmaron una precisión aceptable, sugiriendo que la mayor fuente de variabilidad radica en las partes, aunque el sistema tiene suficiente capacidad para diferenciarlas. Estos resultados son consistentes con los hallazgos reportados por Reyes (2019), quien también encontró que el número de categorías distintas es 5 este resultado estaba dentro de las especificaciones, evidenciando la eficiencia del sistema de medición. Tanto en el estudio de Reyes como en esta investigación, la recolección de datos se realizó mediante un experimento cruzado con

dos factores. Sin embargo, una diferencia clave en este trabajo es la inclusión de un diseño expandido que incorpora tres factores: operarios, partes y balanzas.

Al evaluar la calidad del sistema de medición de la Sal de Maras mediante un diseño experimental factorial completo, los resultados destacan el impacto significativo del tipo de partes (productos) y la habilidad de los operarios en el peso de la sal, con p-valores altamente significativos  $p = 0.000$ . Este hallazgo subraya la importancia de considerar tanto las características de los materiales como la destreza del personal en los procesos de medición. Por el contrario, el factor balanza no mostró diferencias estadísticamente significativas  $p = 0.651$ , lo que sugiere que la tecnología utilizada es consistente y no introduce variabilidad relevante en las mediciones. Adicionalmente, las interacciones entre algunos factores también fueron significativas, lo que refuerza la necesidad de analizar la combinación de variables en lugar de centrarse exclusivamente en efectos individuales. El modelo estadístico mostró un  $R^2$  del 98.98% y un  $R^2$  ajustado del 98.48%, lo que confirma la eficacia del diseño factorial completo en capturar la variabilidad del sistema de medición. Comparando estos resultados con los obtenidos por Huerta (2023), quien también aplicó un diseño factorial, aunque con diferente configuración (tres réplicas), se observa una coincidencia en la identificación de factores significativos y en la efectividad de los modelos de regresión lineal múltiple empleados. No obstante, la diferencia en el número de niveles y réplicas entre ambos estudios resalta la flexibilidad de los diseños factoriales para adaptarse a distintas necesidades de investigación y contextos experimentales.

El objetivo específico de esta investigación fue identificar las interacciones entre los factores operador, balanza y parte en los sistemas de medición de la sal de Maras. A través del análisis de varianza ANOVA, se determinaron interacciones significativas entre operarios por partes, balanzas por partes y operarios por balanzas. El modelo estadístico presentó un  $R^2$  del 98.98%, lo que indica una alta eficacia en la predicción de la variabilidad de los datos. En

la tabla 20, se realizaron comparaciones de Tukey para identificar diferencias significativas entre grupos, específicamente entre las partes y la balanza, mientras que las herramientas gráficas utilizadas fueron fundamentales para interpretar los resultados. El diagrama de Pareto figura 20 identificó que la interacción más influyente es la de partes y balanzas, con un nivel de confianza del 95%. Los hallazgos mostraron que el impacto de un factor depende significativamente del otro, aunque no se encontraron interacciones significativas de tres términos. Estos resultados respaldan la hipótesis de investigación, según la cual los factores operador, balanza y parte tienen interacciones que afectan el sistema de medición. Al comparar con el estudio de Tejada (2014), se observan similitudes en el uso de modelos estadísticos robustos, con un  $R^2$  del 98.39%, superior al 98%, y herramientas como los diagramas de Pareto, gráficos de contorno y superficies tridimensionales. Sin embargo, una diferencia importante radica en que nuestra investigación emplea un diseño factorial completo con tres factores, mientras que la de Tejada (2014) utiliza un diseño factorial de dos niveles con cuatro factores, otra diferencia respecto al autor mencionado realiza gráficas de superficies y de contorno.

La normalidad en los datos es un supuesto fundamental en la aplicación de modelos lineales, ya que garantiza la validez de las inferencias estadísticas. En esta investigación, se verificaron los supuestos de normalidad, variación constante (homocedasticidad) e independencia para un diseño factorial mixto de tres factores. La figura 17 muestra que los residuos se ajustan a una lineal recta, las desviaciones en los extremos indican que no se cumple plenamente el supuesto de normalidad. Además, las figuras 18 y 19 evidencian que los datos cumplen con los supuestos de homocedasticidad e independencia, al no presentar patrones sistemáticos. En comparación, la investigación de Estrada (2023) también confirma el cumplimiento de los supuestos fundamentales del modelo lineal y realiza la prueba de Shapiro-Wilk, cuyo valor de  $p$  es 0.3629, lo que sugiere que los datos siguen una distribución

normal, dado que el valor de  $p$  es mayor que el nivel de significación establecido. Asimismo, no se identificaron patrones que indiquen heterogeneidad de varianza o dependencia en los residuos. Sin embargo, una diferencia notable surge que en nuestro estudio utilizamos la prueba de Kolmogorov-Smirnov y se obtiene un  $p$  inferior a 0.05 indicó que los datos no son normales. Este resultado contrasta con los hallazgos de Estrada, lo que podría atribuirse a la influencia del diseño experimental y los factores considerados. Además, nuestra investigación emplea un diseño factorial mixto con tres factores, mientras que Estrada utilizó un modelo lineal de un solo factor bajo un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Esta diferencia metodológica podría explicar las discrepancias en los resultados de normalidad, ya que la complejidad del diseño afecta la estructura y los supuestos de los datos.

## CONCLUSIONES

### PRIMERO:

De acuerdo con el objetivo general, el análisis ANOVA de la tabla 19 revela que el factor partes y sus interacciones con operarios y balanza tienen un  $p < 0.05$ , por lo tanto, tienen un impacto significativo en la variabilidad del sistema de medición de sal de Maras, comprometiendo su repetibilidad y reproducibilidad. Este hallazgo se refuerza con el alto  $R^2$  ajustado 98.48% y los resultados de la tabla 29, que confirman la influencia crítica de estas fuentes de variación en la consistencia del sistema.

### SEGUNDO:

Según al objetivo específico 1, el sistema de medición de los pesos de la sal de Maras muestra un desempeño aceptable en términos de repetibilidad y reproducibilidad, con un porcentaje de contribución del 3.95% y un porcentaje de variación del 19.89%, ambos dentro de los límites considerados adecuados. Sin embargo, el porcentaje de tolerancia del 27.82% indica un nivel marginalmente aceptable, señalando áreas de mejora necesarias en el proceso. La variación parte es la principal fuente de variabilidad, lo que resalta la importancia de gestionar las diferencias en las partes evaluadas para garantizar un sistema de medición más robusto.

### TERCERO:

Según el objetivo específico 2, la investigación concluye que existen interacciones significativas entre los factores operador, balanza y parte en los sistemas de medición de la sal de Maras. El modelo estadístico aplicado, con un  $R^2$  ajustado de 98.48%, demuestra ser altamente eficaz para explicar las variaciones en los pesos medidos. Además, los análisis gráficos revelan que la relación entre factores es compleja y no uniforme, lo que implica que pequeñas variaciones en uno de los factores pueden tener impactos desproporcionados en los otros.

**CUARTO:**

Según el objetivo específico 3, el sistema de medición utilizado para la Sal de Maras presenta un nivel aceptable de repetibilidad y reproducibilidad, de acuerdo con los análisis realizados mediante gráficas de control de calidad. Las herramientas estadísticas empleadas permitieron identificar patrones de variabilidad, confirmar la confiabilidad del sistema y establecer que las principales fuentes de variabilidad se encuentran en las partes y en las interacciones entre operarios, partes y balanzas. Este resultado respalda la aceptación de la hipótesis planteada, demostrando que las gráficas de control son herramientas eficaces para detectar problemas en el sistema de medición.

**QUINTO:**

El porcentaje de variación del estudio mostró que la reproducibilidad (16.00%) fue mayor que la repetibilidad (11.80%), lo que indica que la mayor fuente de variabilidad en el sistema de medición del peso de la sal de Maras se debe a factores externos al instrumento. Entre ellos destacan las diferencias entre operarios y su interacción con las bolsas, así como variaciones durante el pesaje por la forma en que se colocan las bolsas o por diferencias entre balanzas. Las interacciones partes por balanza (12.60%) y partes por operarios (9.36%) contribuyeron significativamente a esta variabilidad, evidenciando que el sistema no es del todo consistente entre operadores ni balanzas. Por ello, se recomienda estandarizar los procedimientos, capacitar al personal y calibrar regularmente las balanzas.

Si la repetibilidad fuera mayor que la reproducibilidad, la variabilidad se debería al instrumento, lo que requeriría revisar su estado, mantenimiento o reemplazo, y mejorar las condiciones de medición.

## SUGERENCIAS

### **PRIMERO:**

Para el objetivo general, se recomienda combinar estudios de R&R ampliados o expandidos con diseños factoriales para optimizar el análisis de variabilidad en sistemas de medición. Esto permitirá identificar fuentes de error y mejorar la precisión, confiabilidad y toma de decisiones en control de calidad e investigación industrial.

### **SEGUNDO:**

Para el objetivo específico 1, aunque el sistema de medición cumple con los niveles aceptables, se recomienda mejorar el control sobre las diferencias entre las partes evaluadas, ya que son la principal fuente de variabilidad. Además, es clave reforzar los estándares de medición para asegurar mayor precisión y confiabilidad en el proceso.

### **TERCERO:**

Para el objetivo 2, se sugiere realizar un análisis más profundo sobre las interacciones dentro del sistema de medición para identificar factores adicionales que puedan contribuir a la variabilidad observada. Además, sería beneficioso implementar protocolos más estrictos para asegurar que todas las partes utilizadas en el proceso sean consistentes y cumplan con los estándares requeridos por la empresa.

### **TERCERO:**

Según el objetivo específico 3, se recomienda a la empresa incorporar de forma regular el uso de gráficas de control de calidad, ya que permiten monitorear la estabilidad del sistema de medición, detectar variabilidad en tiempo real y tomar decisiones oportunas para mejorar la consistencia del proceso.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Llamosa, L., Meza Contreras, L., & Botero Arbelaez, M. (2007). Estudio de repetibilidad y reproducibilidad utilizando el método de promedios y rangos para el aseguramiento de la calidad de los resultados de la calibración de acuerdo con las normas técnica NTC ISO/IEC 1725. *Scientia Et Technica*, XIII(35), 455-460. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/849/84903579.pdf>
- Araujo, G. (9 de Noviembre de 2023). *La calidad como ventaja competitiva: los aportes de Deming*. Obtenido de <https://www.linkedin.com/pulse/la-calidad-como-ventaja-competitiva-los-aportes-de-deming-araujo-cwxpe/>
- Arias, F. G. (2012). *El proyecto de investigación introducción a la metodología científica*. Episteme. Obtenido de [https://tauniversity.org/sites/default/files/libro\\_el\\_proyecto\\_de\\_investigacion\\_de\\_fidas\\_g\\_arias.pdf](https://tauniversity.org/sites/default/files/libro_el_proyecto_de_investigacion_de_fidas_g_arias.pdf)
- Arreguín Gutiérrez, C. A., & Ávalos, A. (s.f). *Análisis del Sistema de Medición (MSA) "Errores en la medición"*. Obtenido de [https://www.ingenieros.es/files/proyectos/Analisis%20del%20Sistema%20de%20Medicion%20\(MSA\).pdf](https://www.ingenieros.es/files/proyectos/Analisis%20del%20Sistema%20de%20Medicion%20(MSA).pdf)
- Automotive Industry Action Group (AIAG). (2019). Measurement Systems Analysis (MSA). 5. Obtenido de <https://eobliecky.sk/userfiles/file/88286467202.pdf>
- Bello Morales, R. (2019). *Optimización del trabajo en procesos mediante el diseño de experimentos y escenarios de simulación [Tesis de Maestría, Tecnológico Nacional de México en Celaya]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://rinacional.tecnm.mx/handle/TecNM/811>

- Bernal Moreno, C. S., & Vargas Zárate, M. A. (2019). *Estudios de resultados de procesos de medición a través de la medición de pastillas de vehículo mediante uso método ANOVA [Tesis de Licenciatura, Universidad Distrital Francisco José de Galdos ]*. Repositorio Institucional, Bogotá. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/f0e713e7-5351-423f-91ae-25fc1e5298d2/content>
- Botero Arbeláez, M., Arbeláez Salazar , O., & Mendoza Vargaz, J. (2007). Método Anova para realizar el estudio de repetibilidad y reproducibilidad dentro del control de calidad de un sistema de medición. *Scientia et Technica*, 5(37), 533-537. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4787724>
- Cabezón Gutiérre, S. (2014). *Control de Calidad en la Producción Industrial [Tesis de Titulación, Universidad de Valladolid Escuela de Ingeniería Industrial]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/13153/TFG-I-174.pdf>
- Campos Varela, H. C., & Sande Cladera, C. D. (2018). *Evaluación de las condiciones de repetibilidad y reproducibilidad en la producción de disco de antibióticos [Tesis de Licenciatura, Universidad Central de Venezuela]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <http://saber.ucv.ve/handle/10872/19462>
- Carrión García, A., Neira Rueda, J. O., & Grisales, Á. (6 de Noviembre de 2021). *El impacto del rendimiento de los sistemas de medida en la evaluación de la capacidad del proceso*. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/356442008>

- Castro Milla, G. K., & Días Rojas, S. d. (2018). *Intermediación Comercial de la Sal Rosada de Maras en el Perú, Año 2016 - 2017 [Tesis de Licenciatura, Universidad Privada del Norte]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11537/13836>
- Colín, I. (2017). *Análisis y evaluación de un sistema de medición por medio de un estudio R & R [Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de México]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000758639>
- Consulting Group SPC. (06 de Febrero de 2013). *Gráficas de control de calidad* . Obtenido de Consulting Group SPC: <https://spcgroup.com.mx/grafica-de-control/>
- Consulting Grup SPC. (30 de 2017). *Exactitu o Sesgo [Imagen]*. Obtenido de SPC Grup: <https://spcgroup.com.mx/estudio-de-bias-en-sistemas-de-medicion/>
- Correa, A., & Burgos, C. (Marzo de 2007). Diseño e implementación de una metodología Estadística para ensayos de producto terminado en cementos el cairo S.A. 74, 195-207. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/496/49615120.pdf>
- Cruz Quin, G. (2019). *Evaluación de los indicadores físicos, químicos y biológicos del agua potable que se consume en la ciudad del Cusco, 2019 [Tesis de Maestría, Universidad Andina del Cusco]*. Repositorio Istitucional. Obtenido de <https://repositorio.uandina.edu.pe/handle/20.500.12557/5283>
- Escalante Vázquez, E. J. (2013). *Seis Sigma Metodología y Técnica*. Mexixo: Limusa.
- Escamilla López, M., Tejeda Castrejón, J. F., Yáñez Brambila, R., Mejías Brito, J., Meza Jiménez, J., Macedo Velázquez, A., & Ochoa-Suárez, M. (2020). Repetibilidad y Reproducibilidad en las Mediciones del Espesor de Tubos de Acero para Ferroducto. (59). Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94463783003>

Estrada Zuniga, R. (2023). *Evaluación y análisis del rendimiento de 36 genotipos de trigo harinero utilizando el diseño de bloques completos al azar, distrito de Zurite - 2020* [Tesis de Maestría, Universidad San Antonio Abad del Cusco]. Repositorio

Institucional. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12918/7401>

Estudios de Posgrado en Metodología de la investigación en Ciencia de la Salud. (30 de 5 de

2014). *Coefficiente de correlación Intralase*. Obtenido de

[file:///E:/ESTADISTICA%20SUPERIOR/libros%20de%20tesis%20de%20maestria%202024/coeficiente%20de%20correlacion%20intraclase/El\\_coeficiente\\_de\\_correlacion\\_intraclase.pdf](file:///E:/ESTADISTICA%20SUPERIOR/libros%20de%20tesis%20de%20maestria%202024/coeficiente%20de%20correlacion%20intraclase/El_coeficiente_de_correlacion_intraclase.pdf)

*Estudios del sistema de medición para* . (s.f.).

Falcón Rojas, A. R. (2006). *Control estadístico de procesos*. Obtenido de

<https://web.cortland.edu/matresearch/controlprocesos.pdf>

FAO. (25 de 08 de 2022). *Organización de las Naciones Unidas para alimentos y la*

*agricultura* . Obtenido de <https://www.fao.org/peru/noticias/detail-events/es/c/1603081/>

Fernández Bao, S. (2020). *Diseño de Experimentos: Diseño Factorial* [Tesis de maestría,

*Universidad Politecnica de Catalunya Barcelona*]. Repositorio Inatitucional.

Obtenido de [handle/2117/339723/TFM\\_Fernandez\\_Bao\\_Sheila.p](handle/2117/339723/TFM_Fernandez_Bao_Sheila.p)

Fernández, R. (21 de Mayo de 2024). Obtenido de Sal: principales países productores 2023:

<https://es.statista.com/estadisticas/600883/paises-lideres-en-la-produccion-de-sal-a-nivel-mundial/>

General Motors Corporation AIAG. (Junio de 2010). *Ánalysis de Sistemas de Medición. IV.*

Obtenido de

[https://www.academia.edu/24744915/Manual\\_MSA\\_4\\_2010\\_Espanol\\_Cliente](https://www.academia.edu/24744915/Manual_MSA_4_2010_Espanol_Cliente)

Gómez Jiménez, V. B. (2010). *“Análisis de Repetibilidad y Reproducibilidad en Equipos de Medición y Personal que Labora en el Área de Prucción y Calidad de Empresa Alpa [Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez].* Repositorio

Dspace. Obtenido de

<http://repositorio.digital.tuxtla.tecnm.mx/xmlui/handle/123456789/3598>

Gryna, F., Chua, R., DeFeo, J., & Pantoja Magaña, J. (2027). *Método Juran Análisis y planeación* (Quinta ed.). McGRAW-HILL/INTERAMERICANA.

Guillaron, j., Mendez, L., Costa , G., & Hernandez, A. (15 de Diciembre de 2012).

Evaluación de las representaciones de los conceptos de peso y masa de los alumnos de enseñanza media en São Carlos y región (Brasil) y en la provincia de Santiago de Cuba (Cuba). *Latín - American* , 4(6), 639 - 647. Obtenido de

<https://core.ac.uk/download/pdf/37522708.pdf>

Gutierrez Pulido, H., & De la Vara Salazar , R. (2009). *Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma.* McGRAW-HILL.

Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). *Ánalysis de Diseño de Experimentos.* McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Batista Lucio, M. (2014). *Metodología de la investigación* (5ª ed ed.). México: McGraw-Hill.

- Herrera Acosta , R. J., & Fontalvo Herrera, T. J. (2011). *Seis Sigma Metodología Estadística y sus Aplicaciones*. Malaga: EUMED. Obtenido de <https://www.eumed.net/libros-gratis/2011b/939/939.pdf>
- Huaman Quintana, J. R., & Chancayauri Cruz, L. L. (2019). *Aplicacion de las herramientas estadísticas en el control de procesos para variables [Tesis de Titulación, Unaversidad San Antonio Abad del Cusco]*. Repositorio Institucional. Obtenido de [file:///F:/TESIS%20DE%20MAESTRIA/control%20de%20calidad/253T20190408\\_TC.pdf](file:///F:/TESIS%20DE%20MAESTRIA/control%20de%20calidad/253T20190408_TC.pdf)
- Huerta Cruz, E. Y. (2023). *Determinación del espacio de diseño para desarrollar un gel de diclofenaco sódico al 1 % mediante un diseño factorial completo [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Marcos]*. Repositorio Institucional.
- Hunberto Santiago, L. M. (2024). *Factores asociados al conocimiento, actitudes y prácticas sobre el consumo de sal en estudiantes de medicina frente a otras carreras de la universidad Ricardo Palma 2022 II [Tesis de Titulación, Universidad Ricardo Palma]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14138/7294>
- INS. (2020). *Instituto Nacional de salud del Perú*. Obtenido de <https://repositorio.ins.gob.pe/bitstream/handle/20.500.14196/1284/INFO-sal.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Irurita Alzueta, J., & Villanueva Roldán, P. M. (2012). *Sitema de gestión de calidad [Tesis de Titulación, Universidad Publica de Navarra]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/10851013.pdf>
- Jiménez Zárraga, G. S. (2019). *Análisis de un sistema de medición con características multivariantes [Tesis de Titulación, Tecnología Nacional de México en Celaya ]*.

Repositorio Institucional. Obtenido de

<https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/800/1/Giovanni%20Santiago%20Jimenez%20Zarraga..pdf>

Loaiza Arbeláez, R. D. (2013). *Gráficos de control no paramétricos basados en R-estadísticos con aplicación al caso multivariante [Tesis de Titulación, Universidad Carlos II de Madrid]*. Repositorio Institucional, Madrid. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/29405069.pdf>

Mallqui Crisante, L. K. (2018). *Aplicación de la metodología Six Sigma para reducir la merma de Scrap en el proceso de fabricación de sacos de polipropileno [Tesis de Titulación, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/item/f24ccc90-51d1-4d7d-ad1e-561d7dfc810d>

Martínez León, H. C., Temblador Pérez, M., Farris, J., & Beruvides, M. (13 de Febrero de 2019). Integración de herramientas Six Sigma mediante procesos de aprendizaje en equipo. *Quality Assurance in Education*, 27(1), 41 - 55.  
doi:<https://doi.org/10.1108/QAE-07-2018-0079>

Martínez Pérez, J., & Pérez Matin, P. (20 de 11 de 2022). Coeficiente de correlacion intraclase. Obtenido de <file:///E:/TESIS%20MAESTRIA%202025%20FINAL/intrarclases.pdf>

Mejia Bernal, I. L., & Alvarez Prado, S. (2011). *Mdodelos de dirección para aplicación de Six Sigma [Tesis de Licenciatura, Universidad Autonoma de México]*. Repositorio institucional. Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/88/A8.pdf>

- Montgomery C, D. (2004). *Diseño y Análisis de experimentos*. Linusa.
- Montgomery, D. C. (2012). *Control estadístico de calidad*. México: Iberoamericana.
- Moya Muñoz, S. A. (2020). *Implementación del control estadístico de procesos (CEP) en una empresa de planificación [Tesis de Titulación, Universidad de Chile]*. Repositorio Institucional . Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/197734>
- Nave, J., & Nave, F. (06 de 01 de 2023). Técnicas estadísticas utilizadas en la comparación de métodos cuantitativos de medición. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 10(1), 53-75. doi:<https://doi.org/10.36829/63CTS.v10i1.1490>
- Ordorica Villalvazo, J., Camargo Wilson, C., de la Vega Bustillos, E., López Bonilla, O., Olguín Tiznado, J., & López Barreras, J. A. (30 de 10 de 2011). Validación de un sistema de medición aplicado a un estudio de termografía sensorial para la atención de desórtes de traumas acumuladas. (1), 68-84.
- Pacheco Rodríguez, B. R. (2021). *Implementación de un sistema de gestión de calidad aplicando la norma ISO 9001:2015 para mejorar la gestión administrativa de la Empresa Naylamp Ingenieros S.A.C [Tesis de Titulación, Universidad Continental]*. Repositorio Institucional. Obtenido de [https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/9441/4/IV\\_FIN\\_108\\_T\\_E\\_Pacheco\\_Rodriguez\\_2021.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/9441/4/IV_FIN_108_T_E_Pacheco_Rodriguez_2021.pdf)
- Perez Reyes, Y. C. (2018). *Propuesta de mejora de procesos productivos de la sal de mesa en la empresa Daira S.A.C para el cumplimiento de los estándares de calidad [Tesis de Licenciatura, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo]*. Repositorio Institucional, Chiclayo. Obtenido de [file:///F:/TESIS%20DE%20MAESTRIA/tabajos%20de%20sal/TL\\_PerezReyesYovana.pdf](file:///F:/TESIS%20DE%20MAESTRIA/tabajos%20de%20sal/TL_PerezReyesYovana.pdf)

- Pierdant Rodríguez, A. I., & Rodríguez Franco, J. (2009). Control estadístico de la calidad de un servicio mediante Gráficas X y R. (32), 151- 169. Obtenido de <file:///F:/TESIS%20DE%20MAESTRIA/control%20de%20calidad/n32a9.pdf>
- Portuondo Paisan, Y., & Portuondo Moret, J. (Mayo de 2010). La repetibilidad y reproducibilidad en el aseguramiento de la calidad del proceso de medición. *30*(2), 117-121. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543770014.pdf>
- Prieto, E. (Febrero de 2012). *Exactitud y precisión*. Obtenido de Precisión y Exactitud de un sistema de medición EN PDF: <https://materias.df.uba.ar/f1qa2017c1/files/2012/07/exactitud-precision.pdf>
- Reales Chacón, L. J., Robalino Morales, G. E., Peñafiel Luna, A. C., Cárdenas Medina, J. H., & Cantuña-Vallejo, P. F. (10 de 2022). El Muestreo Intencional No Probabilístico como herramienta de la investigación científica en carreras de Ciencias de. *14*, 681-691. Obtenido de [file:///C:/Users/User/Downloads/dfernandez,+Gestor\\_a+de+la+revista,+A70.pdf](file:///C:/Users/User/Downloads/dfernandez,+Gestor_a+de+la+revista,+A70.pdf)
- Reinoso Vasquez, G. (2019). *Propuesta de mejora para la reducción de productos defectuosos en una planta de producción de neumáticos aplicado la metodología Six sigma [Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]*. Obtenido de <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/7517>
- Rendón Castaño, H. D. (2013). *Control estadístico de calidad*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín .
- Restrepo B, L. F. (26 de Abril de 2007). La esperanza del cuadrado medio. *20*(2), 193-201. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3239065>

- Reyes Rodríguez, M. J. (2019). *Análisis de alternativas para estudios de repetibilidad y reproducibilidad [Tesis de Maestría, Tecnología Nacional de México en Celaya]*. Repositorio Intitucional.  
doi:<https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/806/1/Marco%20Jes%C3%BAs%20Reyes%20Rodr%C3%ADguez.pdf>
- Suárez Algarín , C. A. (2020). *Determinación de la repetibilidad y reproducibilidad del método ISO 9622 para la determinación de contenido de grasa en leche cruda en un laboratorio, bajo los lineamientos de la norma NTC 3529-2. [Tesis de Licenciatura, ]*. Repositorio Institucional. Obtenido de  
<https://repository.libertadores.edu.co/items/57e39826-7740-4131-a5d1-d12ba398dcb4>
- Tejada Sánchez, K. F. (2014). *Optimización del proceso de adsorción de Hierro Total con quitina nativa de Emerita analoga “muy muy”, mediante análisis factorial. [Tesis de titulación, Universidad Católica de Santa María]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://repositorio.ucsm.edu.pe/server/api/core/bitstreams/6fc322bc-ace0-44fb-9f1b-2f552659aab8/content>
- Terrazas Márquez, J. d. (2019). *Aplicación de herramientas de optimización estadística para mejorar el torneado de una pieza de acero [Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de CD. Cuauhtemoc México]*. Obtenido de  
<https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/3459>
- Urquizo Alegre, J. S., & Torres Mallma, J. J. (2023). *Propuesta de mejora para reducir la tasa de defectos de una empresa metalmecánica mediante la aplicación de Six Sigma [Tesis de Titulación, Universidad de Ciencias Aplicadas]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/671606>

Vargas Zárate , M. A., & Bernal Moreno, C. S. (2019). *Estudio de resultados de procesos de medición a través de la medición de pastillas de vehiculos mediante el uso de anova* [Tesis de titulación, Universidad distrital Francisco José de Caldas Bogot ].

Repositorio Istitucional. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11349/24765>

Vives Besalduch, E. (14 de 09 de 2010). *Control estadístico de procesos* . Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/37448842/29-control-Estadistico-de-Procesos>

Yep Leung, T. A. (2011). *Propuesta y aplicación de herramientas para la mejeora de calidad de procesos productivos en una planta manufacturera de pulpa y papel tisu* [Tesis de Titulación, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio

Institucional, Lima.

## ANEXOS

## Anexo 1: Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables e indicadores	Metodología
<p><b>Problema general</b></p> <p>¿Cómo es la calidad del sistema de medición de la Sal de Maras mediante un diseño experimental en estudios de repetibilidad y reproducibilidad?</p> <p><b>Problema específico</b></p> <p>1. ¿Cuáles son los coeficientes de repetibilidad y reproducibilidad entre los operadores en los sistemas de medición de Sal de Maras, 2023?</p>	<p><b>Objetivo general</b></p> <p>Evaluar la calidad del sistema de medición de la Sal de Maras mediante un diseño experimental en estudios de repetibilidad y reproducibilidad.</p> <p><b>Objetivos específicos</b></p> <p>1. Determinar los coeficientes de repetibilidad y reproducibilidad entre los operadores en los</p>	<p><b>Hipótesis general</b></p> <p>Un diseño experimental centrado en estudios de repetibilidad y reproducibilidad evalúa de manera efectiva la calidad del sistema de medición de la Sal de Maras, 2023.</p> <p><b>Hipótesis específicas</b></p> <p>1. Existe interacciones entre los factores operador, balanzas y parte del sistema de</p>	<p><b>Variable:</b></p> <p>Sistema de medición</p> <p><b>Indicadores:</b></p> <p>Operarios Balanzas Partes Variable: Pesos</p>	<p><b>Enfoque:</b></p> <p>Cuantitativo</p> <p><b>Nivel:</b></p> <p>Descriptivo – correlacional de corte transversal</p> <p><b>Diseño:</b></p> <p>No experimental</p> <p><b>Población y Muestra:</b></p> <p><b>Población:</b> La población de estudio fue las bolsas de los 1000 gramos producidos por la</p>

<p>2. ¿Cuáles son las interacciones entre los factores operador, instrumento y parte del sistema de medición de la Sal de Maras, 2023?</p> <p>3. ¿Qué patrones mostrarán los diagramas de control de calidad en el monitoreo de la repetibilidad y reproducibilidad en los sistemas de medición de Sal de Maras, 2023?</p>	<p>sistemas de medición de la Sal de Maras, 2023.</p> <p>2. Determinar las interacciones entre los factores operador, balanza y parte en los sistemas de medición de la Sal de Maras, 2023.</p> <p>3. Determinar patrones de control de calidad en el monitoreo de la repetibilidad y reproducibilidad en los sistemas de medición de Sal de Maras, 2023.</p>	<p>medición de los Sal de Maras, 2023.</p> <p>2. Los diagramas de control de calidad identificarán los patrones que indiquen problemas en el sistema de medición de la Sal de Maras, 2023.</p>		<p>empresa, durante el año 2023.</p> <p><b>Muestra:</b> 10 bolsas fijas, 3 operadores seleccionadas aleatoriamente y 3 repeticiones de medida de los pesos.</p> <p><b>Instrumentos:</b> 2 balanza de precisión, para medir el peso de los envases. Hojas o fichas de registro</p>
--	---	--	--	---

