

# Metodología de evaluación de la incidencia del factor humano en la medición intra-laboratorio de volúmenes de líquidos mediante el método gravimétrico y de transferencia en recipientes volumétricos metálicos.

Elvis Aguirre Romero.<sup>1</sup> and Diana Carolina Cáceres.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Fundación Universitaria los Libertadores, Bogotá-Colombia

## Resumen

Los Laboratorios de la Superintendencia de Industria y Comercio (SIC) implementan estudios de verificación intra-laboratorio para demostrar la confiabilidad de los métodos de calibración de recipientes volumétricos Metálicos (RVM) utilizados en las actividades de inspección y de verificación de control metrológico. La diversidad de métodos de medición de volumen de líquidos y de instrumentos volumétricos empleados genera la necesidad de soportar con técnicas estadísticas que los resultados obtenidos por el método de medición gravimétrico y de transferencia son equiparables. El objetivo de esta investigación es evaluar la incidencia del factor humano en la medición intra-Laboratorio de volumen de líquidos mediante los métodos gravimétrico y de transferencia en RVM con capacidad de 20 Litros. Se consideró un diseño experimental de dos factores de naturaleza nominal con 3 y 2 niveles respectivamente. A partir del diseño se construyó el arreglo factorial completo 3x2 con cinco replicas, que permitirá obtener toda la información relevante en relación al efecto de estos factores sobre las mediciones de volumen total. La prueba ANOVA de dos factores muestra que no hay diferencias significativas entre los promedios de las mediciones volumétricas por los dos tratamientos: analistas y métodos de medición. El modelo estadístico propuesto permite dar trazabilidad de la influencia del factor humano en la medición de volúmenes de líquidos en RVM por métodos diferentes.

**Palabras claves:** ANOVA de dos factores, medición volumétrica de líquidos, factor humano, menisco.

## Abstract

The Superintendencia of Industria and Comercio (SIC) Calibration Laboratories implement intra-laboratory verification studies to demonstrate the reliability of the calibration methods for metallic volumetric containers (RVM) used in the inspection and verification activities of metrological control. The diversity of liquid volume measurement methods and volumetric instruments used generates the need to support with statistical techniques that the results obtained by the gravimetric and transfer measurement method are comparable. The objective of this research is to evaluate the incidence of the human factor in the intra-laboratory measurement of liquid volume by gravimetric and transfer methods in RVM with a capacity of 20 liters. An experimental design of two nominal factors with 3 and 2 levels respectively was considered. From the design, was constructed the complete 3x2 factorial arrangement with five replicates, which will allow obtaining all the relevant information regarding the effect of these factors on the total volume measurements. The two-factor ANOVA test shows that there are no significant differences between the means of the volumetric measurements by the two treatments: analysts and measurement methods. The proposed statistical model allows traceability of the influence of the human factor in the measurement of volumes of liquids in RVM by different methods.

**Keywords:** Two-factor ANOVA, volumetric measurement of liquids, human factor, meniscus.

## 1. Introducción

En Colombia las relaciones de consumo que se establecen en el mercado entre los consumidores, los proveedores y/o productores se encuentran reguladas por la Ley 1480 de 2011 Estatuto del Consumidor Congreso de la República de Colombia que tiene como finalidad proteger y garantizar el ejercicio de los derechos de los consumidores.

La Superintendencia de Industria y Comercio (SIC) a través de la delegatura de Control y Verificación

de Reglamentos Técnicos y Metrología Legal, es la entidad gubernamental en el ámbito de la metrología legal responsable de realizar inspecciones de control y vigilancia de protección al consumidor. Para la actividad de inspección se emplean a nivel nacional, equipos patrones de medición calibrados por los Laboratorios de calibración SIC, conocidos en el mercado como recipientes volumétricos metálicos (RVM), utilizados para realizar verificaciones de control metrológico, particularmente, para medir la cantidad de volúmenes de líquido (combustible) en las estaciones de servicio (EDS).

En condiciones ambientales controladas los Laboratorios de Calibración SIC realizan actividades de medición y calibración de RVM, utilizando equipos patrones trazados al sistema internacional de medidas, métodos validados y normalizados y personal idóneo. De acuerdo a los lineamientos de la norma NTC-ISO/IEC 17025: 2017 se deben implementar pruebas de comparación intra-laboratorio de medición de volumen de líquidos como uno de los componentes de la validación de métodos analíticos, herramienta utilizada para demostrar la confiabilidad de los métodos antes de utilizarlos, medir precisión y exactitud de los resultados, evaluar los parámetros que influyen en las mediciones y a su vez evidenciar habilidades, conocimiento técnico y experiencia del personal de laboratorio. Para lograr el desempeño requerido se tienen en cuenta factores como: instalaciones, condiciones ambientales, equipamiento, hojas de cálculo, análisis estadístico y el personal, garantizando así los resultados de las calibraciones.

El operador se considera un elemento que puede incidir directa o indirectamente en los procesos de producción. En el laboratorio el factor humano incide en los procesos por errores de lectura de menisco, calibración, técnica y/o análisis de cálculos. (calibration Guide No. 21, 2021), razón por la cual el desarrollo de habilidades y conocimiento técnico del personal es relevante en la implementación del Sistema de Gestión de Calidad que define las metodologías para hacer seguimiento y asegurar la validez de los resultados generados por los Laboratorios de Calibración SIC según la norma (*ISO/IEC 17025: 2017-Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración*, s.f.)

Bajo la premisa de satisfacer las necesidades del cliente, los Laboratorios de Calibración SIC actualmente implementan 2 procedimientos de calibración de RVM: el método gravimétrico considerado en la cadena de trazabilidad como el método primario y el método de transferencia considerado un método secundario. La diversidad de métodos de medición de volumen y de instrumentos volumétricos empleados genera la necesidad de soportar con técnicas estadísticas que los resultados obtenidos por los dos procesos de medición son equiparables. El objetivo de esta investigación es evaluar la incidencia del factor humano en la medición intra-laboratorio de volumen de líquidos mediante los métodos gravimétrico y de transferencia en RVM con capacidad de 20 Litros, con el fin de detectar tendencias y formular planes de mejoramiento continuo en los casos que se requiera.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Factores que influyen en las mediciones intra-laboratorio de volumen de líquidos.

Para el desarrollo de esta investigación se elaboró un mapa mental que representa la verificación de los factores a controlar previo al desarrollo del experimento con el objetivo de minimizar las posibles fuentes de

error que inciden en la medición volumétrica de líquidos y garantizar el aseguramiento de la calidad de las mediciones registradas.

### 2.2. Los datos

Los diferentes métodos de medición de volumen de líquidos en RVM deben garantizar la trazabilidad metrológica hasta un patrón reconocido formalmente por el Bureau Internacional de Pesas y Medidas (BIPM).

El método gravimétrico es un método primario para la calibración en la magnitud de volumen, consiste en llenar el RVM con el líquido adecuado, realizar ajuste y lectura del menisco que se forma en el tubo visor del RVM y con el uso de un instrumento de pesaje de funcionamiento no automático (IPFNA) o balanza pesar el RVM cuando está lleno de líquido y cuando está vacío; seguido del cálculo de la diferencia de masa del RVM lleno de líquido y del RVM vacío (véase en la Figura 1)

Para realizar las mediciones del volumen correctamente se deben registrar la temperatura del medio ambiente, humedad relativa, presión atmosférica, y conocer el coeficiente cúbico de expansión térmico del material de construcción del instrumento, temperatura y densidad del agua que se determina en función de la temperatura. (calibration Guide No 19, 2018)



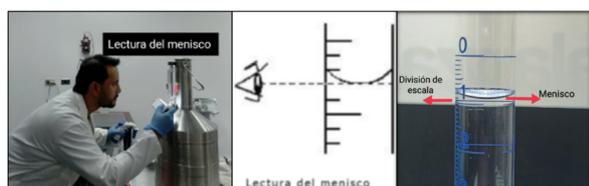
**Figura 1:** Método de medición gravimétrico. Fuente: imagen del laboratorio SIC.

El método de transferencia considerado como un método secundario, consiste transferir un volumen de líquido de RVM 1 con mayor jerarquía (menor error de exactitud) a otro RVM 2 para determinar el volumen final.(véase en la Figura 2) En este método se debe tener presente las correcciones por el coeficiente cúbico de expansión térmico del material y el coeficiente cúbico de expansión térmica del agua junto a la temperatura del líquido. La lectura del volumen se realiza con la observación del menisco que se forma en el visor de los recipientes RVM1 y RVM2 (calibration Guide No. 21, 2021)



**Figura 2:** Método de medición de transferencia. Fuente: imagen del laboratorio SIC.

La lectura del volumen se realiza con la observación del menisco que se forma en el visor del RVM, (véase en la Figura 3), Para leer el menisco sin error de paralaje, el instrumento debe estar en posición vertical y los ojos del analista deben encontrarse a la altura del menisco, en esta posición, el aforo se visualiza como una línea. Con ayuda de un elemento oscuro por debajo del aforo o una división de la escala detrás del tubo visor, el menisco se observará más oscuro y podrá leerse más fácilmente contra un fondo claro. (Alfaro, 2009)



**Figura 3:** Lectura correcta del menisco. Fuente: imagen del laboratorio SIC.

Se registraron las mediciones volumétricas por los métodos gravimétrico y de transferencia, realizadas por tres analistas en cinco fechas diferentes, con el uso de un RVM con capacidad de 18933.87 mL con una incertidumbre asociada de 3.0 mL (según el certificado de calibración). La capacidad del RVM se calculó de acuerdo a los modelos matemáticos de las guías Euramet Calibration Guide No. 19 y Euramet Calibration Guide No. 21.

Se resalta el factor humano como uno de los elementos más importantes al momento de realizar una labor operativa pues es la forma como se materializa una actividad, siempre hay una forma mejor de llevar a cabo un procedimiento se trata de la mejora continua e innovación en los procesos.

La apreciación anterior se deriva de una filosofía japonesa denominada Kaizen, la cual involucra siempre al factor humano como ingrediente perfecto para que los procesos, productos y servicios sean de alta calidad. “la Gestión de calidad total, que es un marco de gestión que recluta a los trabajadores en todos los niveles para centrarse en la mejora de la calidad. Independientemente de la metodología, en un entorno organizacional, el uso exitoso de Kaizen se basa en obtener apoyo para el enfoque en toda la organización”. Daniel Diana (mayo 2021) Kaizen (mejora continua) TechTarget <https://www.techtarget.com/es>

Así mismo la mano de obra suplida por los analistas para llevar a cabo la medición intra-laboratorio de volúmenes de líquidos mediante los métodos gravimétrico y de transferencia en RVM, determina que el factor humano es de vital importancia para aportar, desarrollar y mejorar las tendencias en las futuras mediciones.

### 2.3. Análisis descriptivo de los datos

Para el análisis descriptivo de los datos se evaluaron las medidas de tendencia central, de dispersión, asimetría y curtosis. El software empleado para el análisis estadístico de los datos fue RStudio versión 4.2.2 (2022-10-31 ucrt).

### 2.4. ANOVA de dos factores

Para evaluar la incidencia del factor humano en las mediciones Intra-Laboratorio de volumen de líquidos, se consideró un diseño experimental de dos factores de naturaleza nominal tratamiento A y B, cuentan con 3 y 2 niveles respectivamente.

El tratamiento A corresponde al Analista que realiza las mediciones de volumen total y cuenta con tres niveles: Analista 1 (A1), Analista 2 (A2) y Analista 3 (A3); el tratamiento B corresponde al método de medición de volumen de líquidos en el RVM y cuenta con dos niveles: método gravimétrico (G) y método de transferencia (dT).

A partir del diseño se construyó el arreglo factorial completo 3x2 con cinco replicas, que permitirá obtener toda la información relevante en relación al efecto de estos factores sobre la variable de respuesta. (Gutiérrez, De La Vara, et al., 2008)

Los 3 analistas cuentan con un nivel de experiencia en mediciones metrológicas similar, cada uno realizó 5 mediciones de volumen total en mililitros, por cada método de medición. La tabla 1 describe las características del modelo planteado para el experimento.

**Tabla 1:** Características del arreglo factorial

Factores	Niveles	Réplicas
Analista que realiza mediciones volumen total	Analista 1 (A1)	5
	Analista 2 (A2)	
	Analista 3 (A3)	
Método de medición	Método Gravimétrico (G)	
	Método de Transferencia (dT)	

El modelo estadístico para este diseño experimental considera la interacción entre los factores involucrados, tal como lo ilustra la ecuación 1

$$Y_{ijk} = u + \alpha_i + B_j + \alpha B_{ij} + \varepsilon_{ijk}[1]$$

$$i = 1, 2, \dots, a; j = 1, 2, \dots, b; k = 1, 2, \dots, n$$

Las variables de la ecuación del modelo estadístico del diseño experimental se describen en la Tabla 2.

**Tabla 2:** Variables de la ecuación modelo estadístico

Item	Significado
$Y_{ijk}$	Representa la $j$ -ésima observación del nivel $k$ del tratamiento. $i$
$u$	Es la media general del experimento.
$\alpha$	Es el efecto debido al $i$ -ésimo nivel del factor método de medición volumétrico.
$B_j$	Es el efecto del $j$ -ésimo nivel del factor analista
$\alpha B_{ij}$	Representa el efecto de interacción de la combinación $i - j$
$\varepsilon_{ijk}$	Es el error aleatorio asociado con la medición $Y_{ijk}$

$$\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)[2]$$

En la Tabla 3 se describen los sistemas de hipótesis a probar para establecer la influencia de los factores propuestos sobre la variable de respuesta.

**Tabla 3:** Pruebas de hipótesis para el modelo estadístico

Efecto del factor	Hipótesis
Efectos del Analista	$H_0$ : No existe diferencias significativas entre los promedios de las mediciones de volumen total hechas por los analistas.
	$H_a$ : Existe diferencias significativas en al menos uno de los promedios de las mediciones de volumen total hechas por los analistas.
Efectos del método de medición	$H_0$ : No existe diferencias significativas en los promedios de las mediciones de volumen total hechas por los dos métodos de medición.
	$H_a$ : Existe diferencias significativas entre los promedios de las mediciones de volumen total hechas por los dos Métodos de medición.
Efectos de la interacción del analista y del método de medición	$H_0$ : No existe diferencias significativas entre los promedios de las mediciones de volumen total en la interacción de los tratamientos analista y método de medición.
	$H_a$ : Existe diferencias significativas en los promedios de las mediciones de volumen total en la interacción de los tratamientos analista y método de medición.

$H_0$ : Hipotesis – Nula  $H_a$ : Hipotesis – alternativa  
Fuente :elaboración-propia

Las hipótesis del modelo fueron analizadas mediante un estudio de varianza ANOVA de dos factores. El error aleatorio obedece a un modelo gaussiano, tal como lo ilustra la ecuación 2. (Botero y Arbeláez, 2007)

### 2.5. Verificación de supuestos

Para comprobar los resultados obtenidos en el ANOVA de dos factores, se verificaron los supuestos del modelo estadístico sometiendo las mediciones de volumen total a las pruebas de análisis de Normalidad, Homocedasticidad e Independencia (Toledo, 2010), véase tabla 4.

**Tabla 4:** Consolidado de Supuestos, hipótesis y criterios de rechazo

Supuesto	Hipotesis	componente gráfico/análítico	Criterio de rechazo
Normalidad	$H_0$ : Las mediciones de volumen total siguen una distribución normal.  $H_a$ : Las mediciones de volumen total no siguen una distribución normal.	Gráfica de probabilidad normal	Los datos no se encuentran alineados sobre una línea recta.
		Prueba de Shapiro-Wilks	Si el valor-p es menor al valor de significancia $\alpha = 0,05$ se rechaza $H_0 = 0$
homocedasticidad	$H_0$ : Las varianzas de los tratamientos analista y método de medición son iguales.  $H_a$ : Las varianzas de los tratamientos analistas y método de medición no son iguales.	Gráfica de volumen estimado contra los residuales	Distribución de los puntos con algún patrón claro(embudo) sobre una banda horizontal.
		*Prueba de Bartlett *Prueba de Levene *Prueba de Fligner-K	Si el valor-p es menor al valor de significancia $\alpha = 0,05$ se rechaza $H_0 = 0$

Supuesto	Hipotesis	componente gráfico/análítico	Criterio de rechazo
Independencia	$H_0$ : Las mediciones de volumen total son independientes.  $H_a$ : Las mediciones de volumen total no son independientes.	Gráfica de residuales en orden de corrida.	Detección de tendencia o patrón no aleatorio de los residuos sobre una banda horizontal.
		Prueba de Ljung-Box	Si el valor-p es menor al valor de significancia $\alpha = 0,05$ se rechaza $H_0 = 0$

$H_0$ :hipótesis nula,  $H_a$ :hipótesis alternativa

Fuente: elaboración propia.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Control de factores que inciden en la medición volumétrica de líquidos en comparaciones intra-laboratorio.

En la Figura 4 se ilustran los factores que se definieron como los más relevantes a controlar y que se verificaron previo a la realización de las mediciones intra-laboratorio:

1. Los métodos de medición volumétrica de líquidos se encuentran validados y normalizados.
2. Los certificados de calibración de los instrumentos de medición se encuentran dentro del periodo de validez y cuentan con plan de mantenimiento preventivo actualizado.
3. El material "el líquido" empleado en el experimento cumple con los estándares normativos.
4. Los analistas cuentan con el registro de capacitaciones y evaluaciones que certifican sus habilidades y conocimientos técnicos para el desarrollo de las mediciones intra-laboratorio.
5. El número de mediciones a realizar es coherente con lo propuesto en el diseño del experimento. Y por último;
6. Las condiciones ambientales e instalaciones del laboratorio son óptimas para el desarrollo del experimento.



**Figura 4:** Mapa mental de factores que inciden en la medición volumétrica de líquidos.. Fuente: elaboración propia.

**3.2. Análisis descriptivo de los datos**

En este experimento se obtuvo 30 datos producto del arreglo factorial 3x2 con 5 replicas (véase Tabla 5).

**Tabla 5:** Consolidado de los datos del experimento

Datos	Analista	Método	Volumen Total(mL)
1	A1	G	18934,36
2	A2	G	18932,33
3	A3	G	18933,15
4	A1	dT	18933,25
5	A2	dT	18934,67
6	A3	dT	18935,28
7	A1	G	18934,19
8	A2	G	18933,20
9	A3	G	18933,10
10	A1	dT	18933,18
11	A2	dT	18931,43
12	A3	dT	18931,45
13	A1	G	18933,68
14	A2	G	18932,73
15	A3	G	18932,01
16	A1	dT	18933,42
17	A2	dT	18933,83
18	A3	dT	18932,88
19	A1	G	18933,35
20	A2	G	18933,80
21	A3	G	18930,79
22	A1	dT	18934,41
23	A2	dT	18934,59
24	A3	dT	18931,79
25	A1	G	18933,21
26	A2	G	18933,76
27	A3	G	18933,10
28	A1	dT	18933,80
29	A2	dT	18931,70
30	A3	dT	18933,40

En las medidas de tendencia central y de posición se observa que las mediciones de volumen total oscilan entre

18931,00 y 18935,00 mL (véase en las tablas 6 y 7), donde la media aritmética es menor a la mediana, generando una distribución sesgada hacia la izquierda como se corrobora en la Figura 5 (diagrama de caja y bigotes), el coeficiente de variación menor al 8% indica que la dispersión de los datos es homogénea (Burbano Pantoja, Valdivieso Miranda, et al., 2016)

**Tabla 6:** Medidas de tendencia central

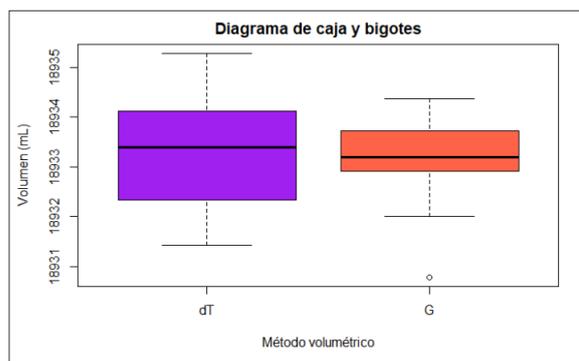
Método de Medición	Medidas de tendencia Central		
	$\bar{x}$	$M_e$	$M_0$
Gravimétrico	18933,12	18933,2	18933,1
de Transferencia	18933,27	18933,40	No tiene

$\bar{x}$  : Promedio,  $M_e$  : Mediana  $M_0$  : Moda

**Tabla 7:** Medidas de Dispersión

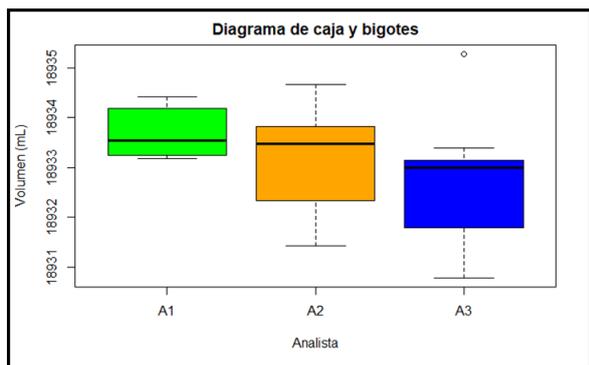
Método De Medición	Medidas de dispersión					
	$s^2$	$s$	$CV$	$Min$	$Max$	$Rango$
Gravimétrico	0.812	0.901	0.0047	18931	18934	3
De Transferencia	1.51	1.23	0.0064	18931	18935	4

$s^2$  : Varianza,  $s$  : Desviación estándar,  $CV$  : Coeficiente de variación,  $Min$  : Mínimo,  $Max$  : Máximo



**Figura 5:** Diagrama de caja y bigotes método medición. dT: método de transferencia, G: método gravimétrico. Fuente: elaboración propia.

La Figura 6, ilustra las mediciones de volumen total por analista. Las mediciones realizadas por los analistas A1 y A2 presentan una distribución similar. Los datos del analista A3 presentan una mayor dispersión comparándolos con los registros de los analistas A1 y A2, adicionalmente se observa que registra un dato atípico con desviación a la derecha, que puede deberse a errores de digitación, omisión del análisis de los datos antes de liberarlos error de paralaje en la lectura del menisco o desviaciones en los procedimientos internos.

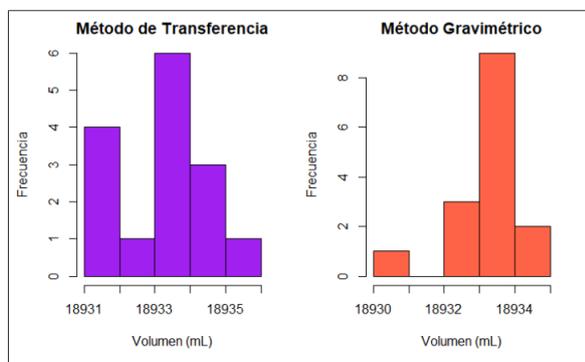


**Figura 6:** Diagrama de caja y bigotes mediciones de volumen total por analistas. A1, A2 y A3: analistas. Fuente: elaboración propia .

En la Tabla 8, se muestran los datos de asimetría y curtosis de los dos métodos de medición. El histograma del método gravimétrico y de transferencia muestra asimetría negativa y un valor de curtosis >0, lo que indica una distribución sesgada a la izquierda leptocúrtica, tal como se observa en la Figura 7

**Tabla 8:** Medidas de forma de los métodos de medición

Método de medición	Medidas de forma	
	Sesgo	Curtosis
Gravimétrico	-1,068	4,109
De transferencia	-0,181	1,952



**Figura 7:** Histogramas método gravimétrico y método de transferencia. Fuente: elaboración propia.

### 3.3. ANOVA de dos factores

La Tabla 9, muestra la magnitud real de las fuentes de variación del experimento, cada una de las fuentes de variación evaluadas tiene un p-valor mayor al nivel de significancia ( $\alpha = 0,05$ ) de acuerdo a los resultados las diferencias en los promedios de las mediciones de volumen total considerando los efectos del analista, método de medición y la interacción de los dos tratamientos no son significativas y se deben a las variaciones muestrales o al error aleatorio.

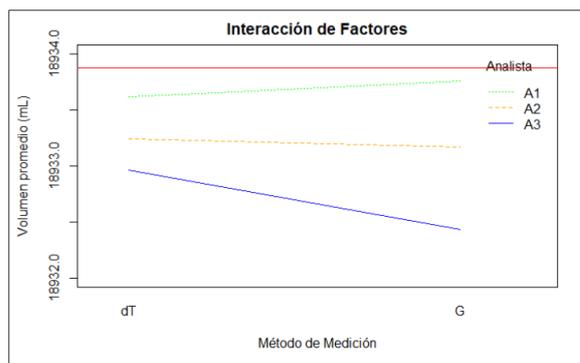
**Tabla 9:** ANOVA de dos factores

Fuente de variación	GL	suma de cuadrados	Cuadrado medio (Varianza)	F	p-valor
Analista	2	4.902	2.4509	2.173	0.136
Método	1	0.179	0.1794	0.159	0.694
Analista: Método	2	0.592	0.2961	0.262	0.771
Residuos	24	27.070	1.1279	N/A	N/A

GL : grados de libertad, F : estadístico de prueba Fisher.  
Fuente: elaboración propia

### 3.4. Representación de los efectos de los factores principales y la interacción:

El efecto de los tratamientos y su interacción sobre la variable respuesta se ilustra en la Figura 8, se observa que no existen diferencias significativas entre los diferentes niveles de los tratamientos, por tanto, los promedios de las mediciones de volumen total de los analistas no dependen del método de medición.

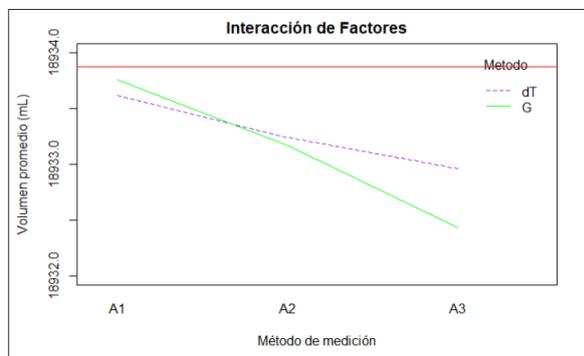


**Figura 8:** Efecto de interacción de los métodos y analistas en la medición de volumen total. dT: método de transferencia, G: método gravimétrico, A1,A2 y A3: analistas. Línea roja: valor de referencia (18933.87 mL).

Al llevar a cabo un análisis detallado de la prueba ANOVA de dos factores, se observa que los promedios de las mediciones de volumen total por los métodos de medición gravimétrico y de transferencia realizadas por el analista A1 son las más cercanas al valor de referencia se ilustra en la Figura 9. En contraste se observa que para el analista A3 el método de medición de transferencia genera diferencias en las mediciones, sin embargo, teniendo en cuenta la capacidad de volumen del equipo patrón utilizado en el estudio intra-laboratorio que corresponde a 18933.87mL y su incertidumbre asociada de 3.0 mL, las posibles desviaciones no afectan en la calidad de los resultados.

Estudios realizados en el área clínica revisan el efecto del factor humano en la calidad de los procedimientos realizados mostrando resultados contradictorios. En uno de ellos se evalúan dos sistemas de escáner intraoral para la impresión digital de implantes dentales considerando la experiencia del operador y concluye que la experiencia del operador no se asocia con la calidad de

las impresiones digitales (Atalay et al., 2021), en paralelo otro estudio concluye que la precisión de los escaneos intraorales estuvo influenciada por la experiencia del operador (Giménez, Pradíes, Martínez-Rus, y Özcan, 2015).

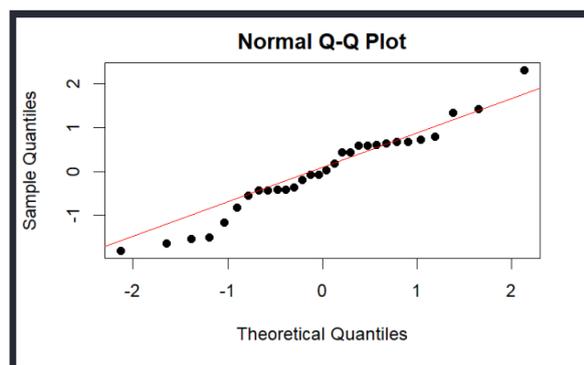


**Figura 9:** Efecto de interacción método volumétrico y analista en la medición de volumen total. dT: método de transferencia, G: método gravimétrico, A1, A2 y A3: analistas. Línea roja: valor de referencia (18933.87 mL).

### 3.5. Verificación de supuestos

#### 3.5.1. Normalidad

La Figura 10 ilustra el componente gráfico del supuesto de normalidad, se observa que los residuales aparecen razonablemente alineados. La prueba de Shapiro-Wilk componente analítico del supuesto de normalidad corrobora esta tendencia con un p-valor = 0.468 mayor al nivel de significancia ( $\alpha = 0,05$ ), lo que indica que las mediciones de volumen total siguen una distribución normal.



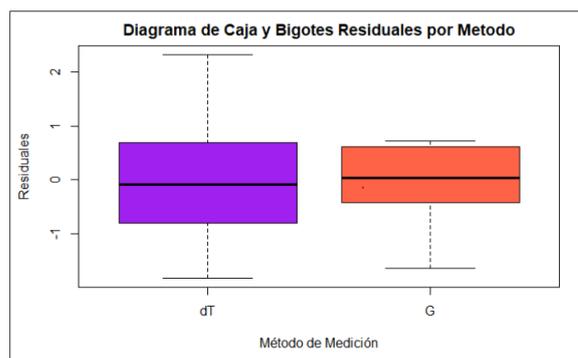
**Figura 10:** Gráfico de probabilidad, supuesto de normalidad

#### 3.5.2. Homocedasticidad

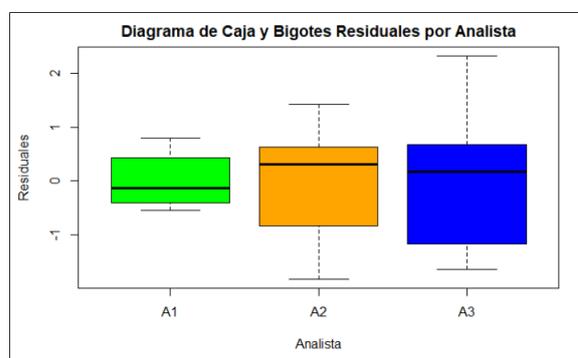
En el gráfico de caja y bigotes como se ilustra en la Figura 11, no se observan diferencias significativas en las varianzas de los métodos, sin embargo la Figura 12 muestra que existen diferencias en las varianzas de la medición de volumen total por analista. La prueba de Bartlett componente analítico del supuesto de homocedasticidad registra para el factor analista un

p-valor = 0.027 menor al nivel de significancia ( $\alpha = 0,05$ ), lo que indica que existen diferencias en las varianzas de las mediciones de volumen total entre los analistas (véase Tabla 10).

La prueba de Bartlett es sensible a las desviaciones de la normalidad, por ello se sugiere como alternativa el uso de pruebas no paramétricas como la prueba Levene o la prueba de Fligner-Killeen, ya que son menos sensibles a las desviaciones de la normalidad. (Monleón-Getino, 2016)



**Figura 11:** Supuesto homocedasticidad de varianzas de los residuales de volumen total por método. dT: método de transferencia, G: método gravimétrico. Fuente de elaboración propia.



**Figura 12:** Supuesto homocedasticidad de varianzas en la medición de volumen total por analista. A1, A2 y A3: analistas. Fuente de elaboración propia.

**Tabla 10:** Prueba de Bartlett para los componentes del ANOVA de dos factores. Fuente: elaboración propia

Componentes ANOVA de dos factores	Grados de libertad	p-valor	Nivel de significancia
Método de medición	1	0.055	$\alpha = 0,05$
Analista	2	0.027	$\alpha = 0,05$
Interacción Métodos de medición y Analista	5	0.100	$\alpha = 0,05$

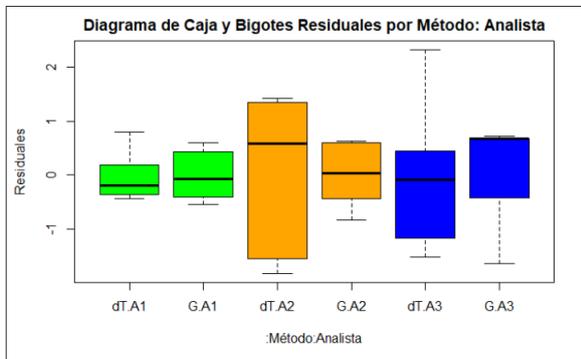
La Tabla 11 muestra los resultados de la verificación de igualdad de varianza con la prueba de Levene, para cada

uno de los factores se obtiene un p-valor mayor al nivel de significancia ( $\alpha = 0,05$ ), por lo tanto, con la aplicación de pruebas no paramétricas es válido el supuesto de igualdad de varianzas de los tratamientos y su interacción.

**Tabla 11:** Prueba de Levene para los componentes del ANOVA de dos factores . Fuente: elaboración propia

Componentes ANOVA de dos factores	Grados de libertad	p-valor	Nivel de significancia
Método de medición	1	0.088	$\alpha = 0,05$
Analista	2	0.068	$\alpha = 0,05$
Interacción Métodos de medición y Analista	5	0.309	$\alpha = 0,05$

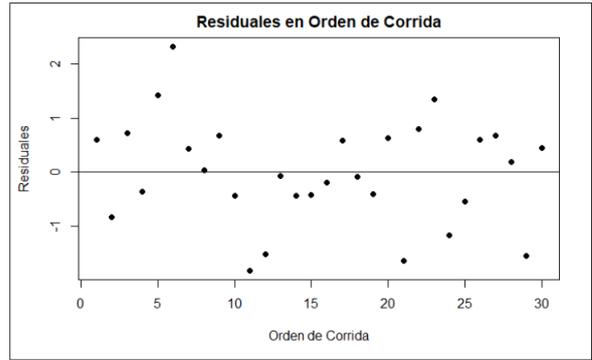
En la Figura 13, la interacción de varianzas entre métodos y analistas muestra que las mediciones hechas por el analista A1 guardan similitud por los dos métodos, en contraste que las mediciones del analista A2 son más precisas por el método gravimétrico y que el analista A3 tiene un mejor desempeño por el método de transferencia.



**Figura 13:** Supuesto de homocedasticidad interacción de varianzas por método y analista. dT: método de transferencia, G: método gravimétrico, A1, A2 y A3: analistas. Fuente de elaboración propia.

**3.5.3. Independencia**

La Figura 14, ilustra el componente gráfico del supuesto de independencia de las mediciones de volumen total en el orden de corrida, los residuales no muestran un patrón definido de comportamiento. La prueba de Ljung-Box corrobora esta tendencia con un p-valor = 0.558 mayor al nivel de significancia ( $\alpha = 0,05$ ), indica que las mediciones de volumen total son independientes.



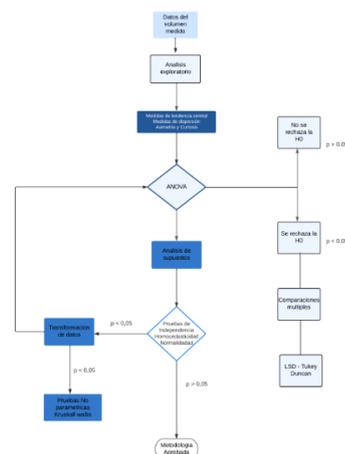
**Figura 14:** Supuesto de independencia de los residuales.

Siguiendo el protocolo de la Figura 15, la prueba ANOVA de dos factores muestra que no hay diferencias significativas entre los promedios de las mediciones de volumen total por los dos tratamientos: método de medición y analista; los resultados de la comprobación de los supuestos del componente demuestran independencia, distribución normal de los datos y la igualdad de varianzas entre los diferentes niveles de los tratamientos y en su interacción.

Si la variable respuesta no cumple con los supuestos de normalidad o de homocedasticidad entonces la validez de los resultados del ANOVA no es significativa, se sugiere abordar estos casos en primera instancia con el uso de pruebas no paramétricas o con la transformación de los datos. En los análisis de los datos con pruebas no paramétricas no se requiere el cumplimiento de la distribución normal ni de la igualdad de varianzas en los tratamientos (Montgomery, 2004).

La transformación de los datos se usa para disminuir diferencias en la dispersión y solucionar los problemas de ajuste del modelo, consiste en hacer un cambio de la métrica de la variable original por una medida en otra escala para correr después el ANOVA. La transformación de Box-Cox en la mayoría de los casos corrige las varianzas desiguales y la falta de normalidad (Melo, Luis, López, Sandra, y Melo, 2020) .

Teniendo en cuenta las limitaciones de este estudio y los resultados obtenidos en otras áreas del conocimiento se sugiere evaluar la incidencia del factor humano integrando analistas con diferentes niveles de experiencia o un número mayor de analistas con nivel de experiencia similar.



**Figura 15:** Diagrama de flujo pruebas estadísticas para comprobación del modelo.Fuente de elaboración propia.

## 4. Conclusiones

Los resultados del experimento demuestran que el factor humano cuenta con las habilidades y el conocimiento técnico para realizar la medición de volumen de líquidos por los métodos de transferencia y gravimétrico, generando resultados confiables.

El modelo estadístico propuesto permite dar trazabilidad de la influencia del factor humano en la medición de volumen de líquidos en RVM por métodos diferentes; se considera una herramienta útil para complementar los procesos de validación de métodos analíticos y evaluar el desempeño de los analistas que desarrollan procesos en el laboratorio.

## Referencias

- Alfaro, O. F. R. (2009). Calibración de hidrómetros con el uso de un sistema semi-automatizado de ajuste y de adquisición de datos. *Ingeniería*, 19(2), 35–61.
- Atalay, S., Çakmak, G., Donmez, M. B., Yilmaz, H., Kökat, A. M., y Yilmaz, B. (2021, 12). Effect of implant location and operator on the accuracy of implant scans using a combined healing abutment-scan body system. *Journal of Dentistry*, 115. doi: 10.1016/j.jdent.2021.103855
- Botero, M., y Arbeláez, O. (2007, 12). Método anova utilizado para realizar el estudio de repetibilidad y reproducibilidad dentro del control de calidad de un sistema de medición. *Scientia et Technica*, 37, 533-537.
- Burbano Pantoja, V. M. Á., Valdivieso Miranda, M. A., y cols. (2016). Inferencia estadística básica: apoyo al estudio independiente.
- calibration Guide No 19, E. (2018). *Guidelines on the determination of uncertainty in gravimetric volume calibration*. Descargado de [www.euramet.org](http://www.euramet.org)
- calibration Guide No. 21, E. (2021). *Guidelines on the calibration of standard capacity measures using the volumetric method*. Descargado de [www.euramet.org](http://www.euramet.org)
- Giménez, B., Pradés, G., Martínez-Rus, F., y Özcan, M. (2015). Accuracy of two digital implant impression systems based on confocal microscopy with variations in customized software and clinical parameters. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 30(1).
- Gutiérrez, H., De La Vara, R., y cols. (2008). Análisis y diseño de experimentos. *México DF: McGraw-Hill Interamericana*.
- Iso/iec 17025: 2017-requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración*. (s.f.).
- Melo, O. O., Luis, M., López, A., Sandra, P., y Melo, E. (2020, 6). *Diseño de experimentos métodos y aplicaciones*.
- Monleón-Getino, T. (2016). Novedades en el anova diseño de experimentos, su análisis y diagnóstico. *University of Barcelona, Barcelona2016*.
- Montgomery, D. (2004). *Diseño y análisis de experimentos* (Vol. Segunda edición).
- Toledo, A. (2010, 7). Empleo de anova para determinar la consistencia entre resultados de mediciones Únicos. *BCT INIMET*, 2, 9-14. Descargado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223017811003>