



**Caracterización metrológica de las  
básculas utilizadas en el proceso de  
galvanizado en la empresa  
SUSEINCO SAS y desarrollo de un  
software para su validación *in situ***

**Illich Maury Polo**

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Puerto Colombia, Colombia  
2021



# **Caracterización metrológica de las básculas utilizadas en el proceso de galvanizado en la empresa SUSEINCO SAS y desarrollo de un software para su validación *in situ***

**Illich Maury Polo**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniero Mecánico**

Director:

PhD. José Daniel Hernández Vásquez

Línea de Investigación:

Energía

Grupo de Investigación:

GI-Fourier

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Puerto Colombia, Colombia

2021



*Dedicado a mi esposa, familia, amigos y profesores que me apoyaron en toda esta aventura que inicié al momento que decidí estudiar esta hermosa carrera.*

*Esta nueva realidad que nos golpea me ha enseñado que podemos adaptarnos a cualquier situación y encontrar nuevas maneras de prepararnos para afrontar los nuevos retos que se avecinan, como el de convertirme en un profesional.*

*ILLICH MAURY POLO*



## **Agradecimientos**

A DIOS por ser mi creador, por darme la vida y bendecirme cada día.

A mi familia por ser mi principal apoyo y motivación, cada día de nuestras vidas.

Agradezco, muy especialmente, a mi profesor José Daniel Hernández Vásquez por su orientación a lo largo del proyecto. A mi Institución Universidad Antonio Nariño Sede Puerto Colombia por permitirme la formación, así como por los años de estudio y enseñanza.





## Resumen

El proyecto se llevó a cabo debido al requerimiento de la empresa SUSEINCO en el área de galvanizado, donde presentaban problemas de incertidumbre con las medidas de peso obtenidas de la báscula. Por tal motivo se diseñó e implemento un proceso de calibración de los instrumentos mediante técnicas estadísticas – método de mínimos cuadrados -, procesos de toma de datos y comparación para verificar que se obtenga valores de medición confiables y con el mínimo grado de incertidumbre.

Con la finalidad de obtener un aseguramiento metrológico, se llevó a cabo un proceso de toma de datos de las mediciones, técnicas de calibración y comparación de resultados, mediante el coeficiente F la cual indica el nivel de certidumbre de la muestra y mediante el cual se toma la decisión de si aceptar o rechazar los resultados.

**Palabras clave:** Incertidumbre, Medición, Metrología, Mínimos cuadrados, Técnicas estadísticas.

## **Abstract**

The project was carried out due to the requirement of the SUSEINCO company in the galvanizing area, where they presented uncertainty problems with the weight measurements obtained from the scale. For this reason, an instrument calibration process was designed and implemented using statistical techniques - least squares method -, data collection and comparison processes to verify that reliable measurement values are obtained with the minimum degree of uncertainty.

In order to obtain a metrological assurance, a process of data collection of the measurements, calibration techniques and comparison of results was carried out, through the coefficient F which indicates the level of certainty of the sample and through which the makes the decision whether to accept or reject the results.

**Keywords:** Uncertainty, Measurement, Metrology, Least squares, Statistical techniques.

# Contenido

1.	Introducción .....	14
1.1	Formulación del Problema .....	16
1.2	Objetivos.....	17
1.2.1	Objetivo General.....	17
1.2.2	Objetivos Específicos .....	17
1.3	Justificación.....	18
1.4	Diseño Metodológico.....	18
1.4.1	Consulta Bibliográfica.....	18
1.4.2	Calibración y Certificación los Equipos de Medición (básculas) .....	19
1.4.3	Análisis Estadísticos de Datos .....	20
1.4.4	Cálculo de Incertidumbre .....	20
1.4.5	Pruebas F y t de Calibración .....	20
2.	Fundamentos de la Metrología .....	21
2.1	Sistema Internacional de Unidades .....	21
2.1.1	Unidades de las Magnitudes Fundamentales.....	21
2.1.2	Sistema de Aseguramiento Metroológico (SAM).....	23
2.2	Normas del Sistema de Aseguramiento Metroológico .....	23
2.3	Ajuste por Mínimos Cuadrados .....	24
2.3.1	Errores de Medidas .....	24
2.3.2	Coeficiente de Correlación .....	25
2.4	Métodos de Medición y Calibración.....	25
2.4.1	Prueba de Repetitividad .....	25
2.4.2	Prueba de Excentricidad .....	26
2.4.3	Ensayo de Linealidad .....	26
3.	Diseño Metodológico.....	27
3.1	Instrumento de Pesaje no Automático.....	27
3.1.1	Instrumento Graduado.....	27
3.1.2	Instrumento no Graduado .....	27
3.1.3	Instrumento con Indicación Automática .....	27
3.1.4	Instrumento con Indicación Semiautomática .....	28
3.1.5	Instrumento con Indicaciones no Automática .....	28
3.2	Normativa Aplicada .....	28
3.3	Descripción del Sistema de Medición.....	28

3.4	Descripción de Pesas Patrón.....	29
4.	Resultados.....	30
4.1	Situación actual de los instrumentos y procedimiento de calibración de las básculas .....	30
4.1.1	Báscula Lexus .....	33
4.1.2	Báscula ICM .....	36
4.2	Cálculo de la incertidumbre expandida asociada a la medición de masa .....	39
4.2.1	Análisis de incertidumbre para la báscula Lexus.....	42
4.2.2	Análisis de incertidumbre para la báscula ICM.....	50
4.3	Desarrollo de un algoritmo computacional .....	58
5.	Conclusiones y Recomendaciones .....	64
6.	Bibliografía.....	66
Anexo A:	Código fuente de la sección balanza.....	69

## Lista de figuras

FIGURA 1 – BÁSCULA LEXUS CON INDICADOR DIGITAL	33
FIGURA 2 - PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA 20 KG DE MASA NOMINAL	34
FIGURA 3 - PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA 60 KG DE MASA NOMINAL	34
FIGURA 4 – BÁSCULA ICM	36
FIGURA 5 - PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA 30 KG DE MASA NOMINAL	37
FIGURA 6 - PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA 80 KG DE MASA NOMINAL	37
FIGURA 7 – CURVA DE CALIBRACIÓN BÁSCULA LEXUS (POLINOMIO DE GRADO 1)	45
FIGURA 8 – CURVA DE CALIBRACIÓN BÁSCULA LEXUS (POLINOMIO DE GRADO 2)	45
FIGURA 9 – CURVA DE CALIBRACIÓN BÁSCULA LEXUS (POLINOMIO DE GRADO 3)	46
FIGURA 10 – CURVA DE CALIBRACIÓN BÁSCULA LEXUS (POLINOMIO DE GRADO 4)	46
FIGURA 11 – CURVA DE CALIBRACIÓN BÁSCULA ICM (POLINOMIO DE GRADO 1)	53
FIGURA 12 – CURVA DE CALIBRACIÓN BÁSCULA ICM (POLINOMIO DE GRADO 2)	53
FIGURA 13 – CURVA DE CALIBRACIÓN BÁSCULA ICM (POLINOMIO DE GRADO 3)	54
FIGURA 14 – CURVA DE CALIBRACIÓN BÁSCULA ICM (POLINOMIO DE GRADO 4)	54
FIGURA 15 – PANTALLA DE INICIO	58
FIGURA 16 – INFORMACIÓN BÁSICA	59
FIGURA 17 – PRUEBA DE EXCENTRICIDAD	60
FIGURA 18 – INFORMACIÓN SOBRE LA TRAZABILIDAD METROLÓGICA	60
FIGURA 19 – FORMATO DE IMPRESIÓN	61
FIGURA 20 – CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN PÁGINA 1	62
FIGURA 21 – CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN PÁGINA 2	63

# 1.Introducción

Los instrumentos de pesaje no automáticos tienen una amplia utilización como instrumentos para determinar la magnitud de masa de los materiales por una amplia gama de empresas e industrias a nivel mundial. Para llevar a cabo dichas mediciones con un alto porcentaje de certidumbre se debe realizar un procedimiento de control metrológico, para análisis, evaluación, verificación y aprobación de los equipos. Es por tal motivo que existe un creciente requerimiento de poseer una calidad metrológica certificada por calibración. [1]

La base de todo proceso de medición está comprendida por el personal, métodos aplicados y equipos utilizados. En lo que respecta a los instrumentos o equipos de medición de masa, debe asegurarse que las mediciones tomadas sean confiables y con alto porcentaje de certidumbre, para ello debe conocerse el error de la toma obtenida. Por lo tanto, todos los equipos de medición utilizados deben ser calibrados metrológicamente para minimizar los errores de medición.

La calibración de los equipos se debe llevar a cabo mediante la realización de tres fases: prueba de excentricidad, prueba de repetitividad y prueba de linealidad o exactitud. Con la realización de dichas pruebas se puede analizar y evaluar las características del funcionamiento del equipo analizado. En ese sentido la excentricidad permite determinar el comportamiento de las lecturas en función de los puntos en los cuales se coloca el material que se desea pesar, por su parte la repetitividad facilita la comparación de las lecturas de medición obtenidas por el equipo en repetidas ocasiones cuando se coloca en un mismo punto y la linealidad permite evaluar los valores de distintos pesos de manera ascendente y descendente. Con este tipo de pruebas se determina la incertidumbre y error de medida en función de los pesos reales de las pesas patrón utilizado.

EL OBJETIVO DE REALIZAR LOS PROCESOS DE CALIBRACIÓN EN ÉSTOS EQUIPOS DE INSPECCIÓN, MEDIDA Y ENSAYO ES poder llevar a cabo su confirmación metrológica, es decir, que se puede determinar a través de los resultados obtenidos en las calibraciones, que el equipo es adecuado o no para garantizar la precisión requerida. [2]

Normalmente, la precisión de medida que se necesita en el equipo, dependiendo de cada caso por el usuario o empresa, determina directamente el criterio de aceptación, definiendo este último, el valor de comparación con el resultado de la calibración o verificación y así determinar si el equipo se encuentra en condiciones óptimas de funcionamiento y garantizar la precisión requerida. [3]

Los equipos deben someterse a un proceso de calibración periódico, porque son el paso del tiempo sus respuestas van perdiendo estabilidad, esto puede ser ocasionado por muchas causas, las cuales individualmente afectan de forma mínima, pero acumuladas pueden ocasionar gran afectación en la precisión mínima establecida, induciendo a error en la aceptación o rechazo correspondiente. Entre las causas más comunes de variaciones se puede incluir el envejecimiento del equipo, deterioros, limpiezas inadecuadas, reacciones químicas varias, entre otras. Esta variación lenta de una característica metrológica de un instrumento de medida se denomina "Deriva". [4]

En el trabajo constante de los laboratorios de metrología, existe una gran cantidad de variables que impactan sobre el resultado de las calibraciones o pruebas realizadas, por lo que se hace necesario el desarrollo de un programa de aseguramiento de la calidad de los resultados, siendo las pruebas de hipótesis unas herramientas muy convenientes para cumplir con este objetivo. [5]

De tal manera que si en la calibración de un equipo de medición de masas, el proceso cumple a cabalidad con los parámetros de aceptación de la prueba F, unificada a la prueba t o a la prueba de consistencia, no hay certeza en contra para suponer que la calibración se ha llevado a cabo de manera confiable. [6]

Para efecto de la metrología de masas, se utilizan pruebas de hipótesis para mantener bajo control estadístico el proceso de calibración. A continuación, el método de aplicación de la prueba F, la prueba t y una prueba de consistencia que pueden ser utilizadas para probar la desviación estándar de la báscula. [7]

Debido a la importancia de las básculas para el proceso de galvanizado de la empresa, y su influencia en el aspecto financiero de la empresa SUSEINCO, el presente proyecto se basa en aplicar el método de mínimos cuadrados con la finalidad de establecer un procedimiento de ajuste con el cual determinar la confiabilidad metrológica de las básculas del área de galvanizado de la empresa.

## **1.1 Formulación del Problema**

En la actualidad la precisión en la medición es un tema que cobra una vital importancia, en especial los relacionados con la medición de masas que tienen influencia directa en las finanzas y economía de una empresa, es por ello por lo que debe garantizarse la confiabilidad de los resultados de medición obtenidos de los equipos dispuestos para tal fin. Es por ello por lo que debe realizarse calibraciones de manera periódica para garantizar el buen funcionamiento de estos equipos y evitar errores al momento de pesar materia prima o materiales que puedan generar pérdidas a la empresa. [8]

La empresa SUSEINCO está presentando inconvenientes durante el proceso de pesaje de los perfiles y chapas metálicas, obteniendo lecturas erróneas que generan problemas durante el proceso de galvanizado y por ende pérdidas económicas. Por lo tanto, se hace necesario con carácter de urgencia llevar a cabo un proceso de calibración y verificación de los equipos de medición de la compañía con la finalidad de solventar la problemática existente.

Cabe destacar que muchos de estos instrumentos no cuentan con un certificado de calibración que permita identificar la confiabilidad metrológica de estos equipos, así como aspectos que impactan de forma significativa en el proceso de medición, como lo son los errores, histéresis e incertidumbres. Por lo que es necesario llevar



a cabo el proceso de calibración para determinar todos los elementos necesarios para incrementar la eficiencia de la medición de dichos equipos.

Además de solventar las fallas actuales, el procedimiento fundará las bases para establecer las pautas metrológicas para aplicación futura a los equipos, que garanticen su buen funcionamiento, asegurando mediciones con un margen de error dentro de los estándares permitidos.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Caracterizar metrológicamente las básculas utilizadas en el proceso de galvanizado en la empresa SUSEINCO SAS y desarrollo de un software para su validación *in situ*.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Para atender el objetivo general de la investigación, se han formulado cuatro objetivos específicos.

- Analizar la situación actual de los instrumentos de medición en la empresa SUSEINCO SAS.
- Realizar la calibración de las básculas con patrones trazables a patrones internacionales con el fin de garantizar la confiabilidad de los resultados al sistema internacional de unidades.
- Calcular la incertidumbre expandida asociada a la medición de masa, con el fin de comparar el desempeño metrológico de las básculas usando la prueba t-student.
- Desarrollar un algoritmo computacional que permita la generación de un certificado de calibración de las básculas en lugar de operación del proceso de galvanizado

## **1.3 Justificación**

Este proyecto de investigación encuentra se fundamenta en el objetivo de mejorar las mediciones realizadas por las Básculas de la empresa SUSEINCO, empleadas para el pesaje de los materiales a utilizar durante el proceso de galvanizado. Es imprescindible colocar en práctica las diferentes técnicas metrológicas y estadísticas disponibles en la literatura, entre las cuales se tienen el método de los mínimos cuadrados ordinarios y el análisis de incertidumbre con las Prueba  $F$  y  $t$ , de acuerdo con la teoría que se encuentra en la Guía para la estimación de la Incertidumbre de Medición. [9]

Con el desarrollo del proyecto se busca dar solución a la problemática de medición actual presentada por la empresa SUSEINCO y además de marcar las pautas o procedimientos a realizarse a futuro con la finalidad de garantizar el buen funcionamiento y de los equipos de medición minimizando los errores dentro de un rango aceptable.

Además de los beneficios mencionados anteriormente, con el desarrollo del proyecto se espera incrementar el conocimiento del desempeño metrológico de una báscula, con lo que se podrá identificar con mayor facilidad los factores de incertidumbre de los equipos de medición, con la finalidad de incrementar su confiabilidad.

## **1.4 Diseño Metodológico**

Para un mejor entendimiento de la propuesta de trabajo de grado se presenta la cronología de las actividades más importantes que fueron realizadas durante el metodológico del proyecto.

### **1.4.1 Consulta Bibliográfica**

Se utilizaron bases de datos internacionales como Science Direct / Scopus, así como libros y revistas especializadas en el área de investigación. Se hizo énfasis

en antecedentes documentados de trabajos similares al aquí expuesto cuya contribución haya sido relevante para el estado del arte.

### **1.4.2 Calibración y Certificación los Equipos de Medición (básculas)**

En esta etapa se realizó la calibración de la báscula utilizada para medir el peso de los materiales en el área de galvanizado, para ello se utilizaron pesas de patrones con rangos de peso desde 10 hasta 100 Kg. Para la realización de esta etapa se dividió en tres fases:

- Prueba de Repetibilidad

En esta fase se realizaron las mediciones de peso de tres pesas patrones de 50, 100 y 200 kg. Se hicieron varias mediciones con cada pesa y se anotaron los resultados en cada uno de ellos, con la finalidad de desarrollar el cálculo de la Repetibilidad y el error de medida con base en el análisis de varianza.

- Prueba de Excentricidad

En este punto se seleccionaron 5 puntos de la báscula en la cual colocar el peso, para tomar las medidas. La pesa seleccionada fue la de 50 Kg. En vista que la báscula es rectangular se seleccionaron las cuatro esquinas y el punto central para hacer las mediciones.

- Prueba de Linealidad

Se realizaron diez mediciones con diferentes pesos, el punto seleccionado fue el centro de la báscula. Se determinó el promedio de las lecturas, para posteriormente realizar el ajuste del modelo de regresión con el método de mínimos cuadrados y con ello proceder a determinar el tipo de comportamiento presentado por los valores obtenidos.

### **1.4.3 Análisis Estadísticos de Datos**

Con los datos obtenidos durante las mediciones se realizó una hoja de cálculo en el software Microsoft Excel, para llevar a cabo el análisis estadístico de los mismos, mediante el diseño de tablas y gráficos que sirvieron para el análisis de las curvas de calibración. Para un mejor análisis se hizo uso de ecuaciones obtenidas en diversas literaturas, además del uso de fórmulas facilitadas por el programa Excel.

### **1.4.4 Cálculo de Incertidumbre**

Una vez realizadas las tablas, cálculos y estimación de curvas de calibración, se procedió a determinar variables estadísticas como la media, mediana, moda, desviación estándar y cuadrática. Con dichos valores se procedió a determinar el error absoluto y margen de error, con lo cual se obtuvo la incertidumbre real del equipo.

### **1.4.5 Pruebas F y t de Calibración**

Finalmente es esta última parte se procedió a calcular los valores de las pruebas F y T, para determinar la eficiencia de los procesos de calibración realizados, por lo tanto, se trata de una evaluación de la calibración del equipo. A partir de estos resultados se definió la estrategia a implementar que permitirá la mejora continua de los procesos de medición llevados a cabo en el área de galvanizado.

## 2. Fundamentos de la Metrología

La puesta en marcha de un sistema comprobación metrológica se ha convertido en una metodología poderosa para las grandes y medianas empresas que quieren aumentar la calidad de sus procesos de medición para así ser competitivas en el exigente mercado actual [10].

### 2.1 Sistema Internacional de Unidades

El sistema internacional de unidades (SI) o “sistema métrico” es un sistema de magnitudes que está basado en las magnitudes básicas (fundamentales), i.e.: longitud, masa, tiempo, corriente eléctrica, temperatura termodinámica, cantidad de sustancia e intensidad luminosa. El SI surge por la necesidad de centralizar la gran diversidad de unidades existentes en los diferentes campos de estudio, cómo la física, química, medicina, etc, esto con el fin de mejorar la transferencia y entendimiento de los datos entre las comunidades internacionales [11].

El sistema internacional nace del sistema del sistema métrico decimal, el cual fue implementado en la I Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) y luego ratificado en 1875 por 15 países [12]. En ese mismo año se da la firma de la convención del metro, en la que asistieron representantes de 8 países y allí se crea un Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), con el objetivo de:

- Establecer un conjunto de reglas para las unidades de medida
- Buscar diferentes opiniones de los medios científicos, técnicos y educativos de todos los países.

- Ofrecer recomendaciones para el establecimiento de un sistema práctico y versátil para las unidades de medida y que este pudiera ser adoptado por todos los que participaron en la firma de la convención del metro.

### **2.1.1 Unidades de las Magnitudes Fundamentales**

A continuación, se presentan las unidades de las siete magnitudes fundamentales definidas en el sistema internacional de unidades. Estas definiciones, exceptuando el kilogramo (unidad de masa), se encuentran basadas en constantes físicas. [12]

- Metro: es la unidad de longitud. Un metro es la longitud de trayecto recorrido en el vacío por la luz durante un tiempo de  $1/299\,792\,458$  de segundo.
- Segundo: es la unidad de tiempo. El segundo es la duración de  $9\,192\,631\,770$  periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133.
- Kelvin: es la unidad de temperatura termodinámica. Un kelvin es la temperatura termodinámica correspondiente a la fracción  $1/273,16$  de la temperatura termodinámica del punto triple del agua.
- Mol: es la unidad de cantidad de sustancia. Un mol es la cantidad de sustancia de un sistema que contiene tantas entidades elementales como átomos hay en  $0,012$  kilogramos de carbono 12. Cuando se emplea el mol, es necesario especificar las unidades elementales, que pueden ser átomos, moléculas, iones, electrones u otras partículas o grupos especificados de tales partículas.
- Amperio: es la unidad de intensidad de corriente eléctrica. Un amperio es la intensidad de una corriente constante que, manteniéndose en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable y situados a una distancia de un metro uno de otro en el

- Candela: es la unidad de intensidad luminosa. Una candela es la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  hercios y cuya intensidad energética en dicha dirección es  $1/683$  vatios por estereorradián.
- Kilogramo: es la unidad de masa. Un kilogramo es una masa igual a la almacenada en un prototipo cilíndrico de platino-iridio (90% de platino y 10% de iridio) y 32 mm de alto por 32 mm de radio.

### **2.1.2 Sistema de Aseguramiento Metrológico (SAM)**

Es un conjunto de operaciones que acercan más a una industria a la calidad requerida por el mercado o normas. El SAM se debe diseñar de una única forma para un proceso de medición; se requiere conocer las variables del proceso y de los instrumentos de medición que intervienen directamente en dicho proceso. [12]

## **2.2 Normas del Sistema de Aseguramiento Metrológico**

Diversas normas internacionales hacen referencia a un sistema de calidad en las mediciones. La ISO 9001:2008 [13] y la ISO 14001:2004 [14], que son utilizadas para la certificación de procesos y sistemas en las empresas, cuentan dentro de sus requisitos el aseguramiento de las mediciones y equipos de medición.

El seguimiento de la norma ISO 17025:2005 [15] se hace necesario para la acreditación del proceso de calibración, en todos sus incisos maneja el aseguramiento metrológico.

La norma ISO 10012:2003 [16] define los elementos fundamentales de los sistemas de gestión en la medición y conceptos relacionados. Entrega una guía o línea a seguir para desarrollar las actividades adecuadas en los procesos por medio del control de la medición de los instrumentos que hacen parte de ellos.

Todas estas normas citadas (con su correspondiente Norma Técnica Colombiana), se refieren a la calibración de los equipos de medición, debido a que el control de los procesos de medición se hace fundamental para el fortalecimiento y mejora de los sistemas productivos.

## 2.3 Ajuste por Mínimos Cuadrados

Se fundamenta en controlar el sistema en diferentes condiciones, utilizando distintos valores para la variable independiente  $x$ , y tomando nota en cada caso el valor medido correspondiente para la variable dependiente  $y$ . De esta manera se consigue una serie de puntos o coordenadas  $(x_1, y_1) \dots (x_n, y_n)$  que cuando las representamos gráficamente deben arrojar una línea recta. Sin embargo los errores de medición siempre presentes pueden ocasionar que no se encuentren perfectamente alineados. Éste método de mínimos cuadrados determina los valores de los parámetros  $a$  y  $b$  de la recta que mejor se ajusta a los datos encontrados en el experimento. [17]

$$m = \frac{n(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \quad (1)$$

$$b = \frac{(\sum y_i) - m(\sum x_i)}{n} \quad (2)$$

### 2.3.1 Errores de Medidas

Los errores que se puedan presentar en las medidas se representaran en errores en los resultados de  $a$  y  $b$ . Existe un método para calcular dichos errores. En un inicio el método de mínimos cuadrados asume que fijando las condiciones experimentales, los valores de  $y_i$  de la variable independiente se conocen con absoluta precisión. Las mediciones de la variable de la variable  $x$ , se verán afectadas de sus errores correspondientes, si  $\epsilon$  es el valor máximo de todos los errores. [17]

Entonces se tiene que:



$$\Delta a = \frac{\sqrt{n} * \varepsilon}{\sqrt{n \sum_1^n x_i^2 - (\sum_1^n x_i)^2}} \quad (3)$$

$$\Delta a = \frac{\varepsilon}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

### 2.3.2 Coeficiente de Correlación

El coeficiente de correlación es otro indicador para el estudio de una distribución bidimensional, este indica el grado de dependencia entre las variables x e y. [17]

El coeficiente de correlación r es un número que se obtiene mediante la fórmula:

$$r = \frac{n(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n \sum_1^n x_i^2 - (\sum_1^n x_i)^2][n \sum_1^n y_i^2 - (\sum_1^n y_i)^2]}} \quad (5)$$

## 2.4 Métodos de Medición y Calibración

Las pruebas se realizan para determinar lo siguiente: la repetibilidad de lo que registra el indicador, los errores registrados en las indicaciones, el resultado de colocar una carga excéntrica, etc. Para poder realizar el proceso de calibración, se debe determinar el número de mediciones que se van a realizar para las calibraciones de rutina que se llevarán a cabo en su procedimiento. Se debe tomar en cuenta que entre más repeticiones se realicen, se reduce la incertidumbre, pero a su vez aumenta los costos por la utilización de mayores recursos, sin embargo, se debe realizar un número mínimo de repeticiones para garantizar que los resultados sean los esperados. [18]

### 2.4.1 Prueba de Repetitividad

La prueba consiste en colocar una carga repetitiva de la misma magnitud en el receptor de carga, bajo las mismas condiciones de manejo de la carga y el instrumento de medición. También es necesario que se realicen bajo las mismas condiciones, tanto como sea posible. No es necesario que las cargas que se van

a utilizar en la prueba sean calibradas ni verificadas, al menos que los resultados obtenidos sirvan para encontrar errores de indicación. [18]

### 2.4.2 Prueba de Excentricidad

Esta prueba consiste en colocar una carga de prueba en diferentes sectores del receptor de carga, con el fin de que el centro de gravedad que genera la carga ocupe lo más posible las posiciones referenciadas en la imagen. Como en la prueba anterior, no es necesario que la carga que se va a utilizar en la prueba sea calibrada ni verificada, al menos que los resultados obtenidos sirvan para encontrar errores de indicación. [18]

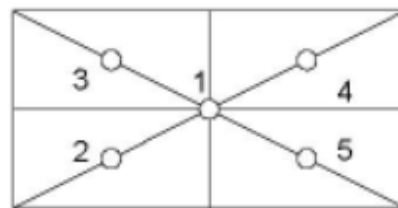


Figura 1 – Puntos de medición en prueba de excentricidad

Fuente: Soler, V., Pérez, E., & Aznar, I. (2012).

### 2.4.3 Ensayo de Linealidad

Este ensayo consiste en tomar varios puntos a través de la escala de medición del instrumento en prueba, es un indicador que el instrumento presenta problemas de linealidad. Estos problemas nos revelan que el instrumento no realiza las mediciones con la misma exactitud a lo largo de toda la escala. Inclusive cuando el cero y el span sean los correctos, se pueden presentar errores en la mitad de la escala, lo que se denomina errores de linealidad, o no linealidad. [18]

## **3. Diseño Metodológico**

En este capítulo se explica y describe el procedimiento llevado a cabo con la finalidad de obtener los datos necesarios para desarrollar el análisis y evaluación requeridos para llegar a los resultados de la investigación. Además, describe en detalle el sistema de medición adoptado, así como las características técnicas y metrológicas de los instrumentos utilizados en el curso de los experimentos.

### **3.1 Instrumento de Pesaje no Automático**

Este tipo de instrumento necesita de una persona u operador durante el proceso de medición de la masa, es decir, se necesita una persona para colocar o retirar la masa que se va a medir y también debe anotar los resultados obtenidos durante la medición. Este instrumento permite la observación inmediata de los resultados de las mediciones a través de una pantalla, display o mediante una impresión. Todas estas opciones están contempladas dentro de la palabra “indicación”. [3]

Estos instrumentos pueden clasificarse como: graduado o no graduado, con indicación automática, semiautomática o no automática, los cuales se explican a continuación: [3]

#### **3.1.1 Instrumento Graduado**

Este instrumento nos permite tener una lectura de la masa de manera directa durante el proceso de medición, ya sea completa o parcial.

#### **3.1.2 Instrumento no Graduado**

Este instrumento está desprovisto de una escala numerada en unidades de masa que posibilite la realización de una lectura de la medición de la masa.

### **3.1.3 Instrumento con Indicación Automática**

Este instrumento de medición de masa es el que retorna a su estado de equilibrio sin la necesidad de la intervención de una persona.

### **3.1.4 Instrumento con Indicación Semiautomática**

Es un instrumento con un rango de pesar de indicación automática en el cual el operador debe intervenir para alterar los límites de rango de medición del equipo.

### **3.1.5 Instrumento con Indicaciones no Automática**

Es un instrumento en el cual se alcanza la posición de equilibrio de medición únicamente con la intervención de un operador.

## **3.2 Normativa Aplicada**

La norma aplicada para el proceso de calibración, análisis de resultados y evaluación de error de medidas fue la Norma Técnica Colombiana 2031.

## **3.3 Descripción del Sistema de Medición**

Para llevar a cabo el proyecto se realizó la calibración de una báscula de pesaje con una capacidad nominal de 1500 kg La báscula cuenta con las siguientes especificaciones: dimensión de 1 m x 1 m, indicador de medición digital, indicador con salida RS232. Se puede detallar mejor en la Figura 2.



Figura 2 – Bascula de pesaje utilizado para su calibración

Fuente: Autores 2021

### 3.4 Descripción de Pesas Patrón

Para llevar a cabo el proceso de calibración del equipo se utilizaron pesas patrón con un rango de 10 a 100 kg. Las cuales fueron utilizadas en distintos patrones de combinaciones para obtener unos resultados que fuesen los más eficientes y representativos posibles. En la figura 2 se muestra algunas de las pesas patrón utilizadas durante el desarrollo del proyecto.



Figura 3 – Pesas patrón de medición utilizada en la calibración

Fuente: Autores 2021

## **4. Resultados**

En este capítulo detalla los principales resultados de la investigación desarrollada con el fin de evaluar la confiabilidad metrológica de las básculas utilizadas en el proceso de galvanizado.

### **4.1 Situación actual de los instrumentos y procedimiento de calibración de las básculas**

Las balanzas analizadas y estudiadas en el presente trabajo investigativo fueron evaluadas experimentalmente según los lineamientos establecidos en la Guía SIM (2009). Inicialmente fue realizada una limpieza general a los equipos de medición y, seguidamente, por tratarse de dispositivos electrónicos, se esperó un lapso de 30 minutos para estabilizar el sistema interno.

Una vez realizado el procedimiento anterior, se realizaron los test experimentales y analíticos, según se describe a continuación:

- (i) se analizó el rango de operación de la balanza mediante un proceso de carga ascendente y un proceso de carga de descendente, mediante la aplicación de masas patrón certificadas;
- (ii) para cada punto experimental obtenido, fue medida la presión atmosférica y la temperatura ambiente;
- (iii) se determinaron las incertidumbres asociadas a la medición de la temperatura ambiente, la presión atmosférica y la densidad del aire. Este análisis fue realizado dividiéndose la resolución del instrumento por la raíz cuadrada de tres. Este procedimiento es sugerido por la ISO GUM para

- asociar los datos experimentales a una distribución rectangular de probabilidad;
- (iv) se calculó la relación de la aceleración de la gravedad y el efecto del empuje (principio de Arquímedes);
- (v) se determinó las diferentes curvas de calibración para los polinomios de grado uno, dos, tres y cuatro;
- (vi) fue calculada la desviación media cuadrática (*i.e.*: incertidumbre de ajuste), mediante la siguiente ecuación, para establecer el polinomio que mejor ajusta los datos experimentales:

$$u_s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (m_{ap} - m_a)^2}{N - n - 1} \quad (6)$$

en esta expresión:

$u_s$  = incertidumbre de ajuste;

$m_{ap}$  = masa aparente;

$m_a$  = masa ajustada;

$N$  = número de puntos experimentales;

$n$  = número de coeficientes estimados en el polinomio de ajuste.

- (vii) una vez realizado lo descrito en los ítems anteriores, se procedió a estimar la incertidumbre expandida ( $k=2$ ) asociada a la medición de masa para un intervalo de confianza de 95,45%.

El procedimiento descrito anteriormente fue, de forma general, aplicado a todos los instrumentos objeto de análisis en la presente investigación. El número de puntos experimentales fue seleccionado en función del rango de medición de cada instrumento en particular.

En el curso de los experimentos fueron utilizados los patrones de medición del laboratorio certificado por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC) y el Organismo Nacional de Acreditación (ONAC). Este laboratorio,

cuenta con patrones de medición para la calibración de masa, cuyas especificaciones técnicas son detalladas a seguir. Fue utilizado un juego de masa con capacidad de medición de 1 mg hasta 2 kg, cuyo certificado de calibración fue emitido por el laboratorio Detecto de Colombia. Adicionalmente, fue utilizada una masa patrón, cuyo valor nominal es de 20 kg, según lo estipulado por el certificado de calibración.

**Tabla 1** – Clase de exactitud de las masas patrones

<b>Valor patrón (kg)</b>	<b>Identificación de las masas patrones</b>
1	1 kg (F1)
2	2 kg (F1)
3	1 kg (F1); 2 kg (F1)
4	2 kg (F1); 2 kg (F1)
5	5 kg (F1)
6	1 kg (F1); 5 kg (F1)
7	2 kg (F1); 5 kg (F1)
8	1 kg (F1); 2 kg (F1); 5 kg (F1)
9	2 kg (F1); 2 kg (F1); 5 kg (F1)
10	1 kg (F1); 2 kg (F1); 2 kg (F1); 5 kg (F1)
20	Masa patrón 20 kg (M1)
21	1 kg (F1); Masa patrón 20 kg (M1)
22	2 kg (F1); Masa patrón 20 kg (M1)
23	1 kg (F1); 2 kg (F1); Masa patrón 20 kg (M1)
24	2 kg (F1); 2 kg (F1); Masa patrón 20 kg (M1)
25	5 kg (F1); Masa patrón 20 kg (M1)
30	1 kg (F1); 2 kg (F1); 2 kg (F1); 5 kg (F1); Masa patrón 20 kg (M1)

El uso de las masas patrones anteriormente descrita, garantiza la trazabilidad de los resultados de medición de masa a patrones nacionales e internacionales. Lo anterior resalta la importancia de utilizar este tipo de masas certificadas con el fin de obtener menores incertidumbres asociadas a la medición de masa.

A seguir, con el fin de darle cumplimiento al primer objetivo específico, se describe el estado actual de las balanzas utilizadas en la empresa suseinco para el proceso de galvanizado de perfiles metálicos.



### 4.1.1 Báscula Lexus

Esta balanza es utilizada para el proceso de pesaje de perfiles metálicos hasta 80 kg. La Tabla 2 presenta las características técnicas de la balanza y, la Figura 1, ilustra dicho instrumento de pesaje.

**Tabla 2** – Características de la báscula Lexus

Datos del Instrumento	
Ubicación	Suseinco
Clasificación	Media (III)
Fabricante	Lexus
Modelo	Matrix One
Número de serie	No indica
Carga máxima	80 kg
Resolución	0,05 kg



**Figura 1** – Báscula Lexus con indicador digital

Fuente: Elaboración propia

En el curso de los experimentos fueron obtenidos 30 puntos experimentales (15 para carga ascendente y 15 para carga descendente). La Figura 2 ilustra el

proceso experimental para la situación de 20 kg de masa certificadas en la balanza de estudio y, la Figura 3, muestra la situación para una masa de 60 kg.



**Figura 2** - Procedimiento experimental para 20 kg de masa nominal

Fuente: Elaboración propia



**Figura 3** - Procedimiento experimental para 60 kg de masa nominal

Fuente: Elaboración propia

Las Tablas 3 y 4 detallan los datos experimentales obtenidos, para la situación de carga ascendente y descendente, respectivamente:

**Tabla 3 – Datos experimentales: carga ascendente**

<b>Carga Ascendente</b>				
<b>Número de puntos experimentales</b>	<b>Masa patrón</b>	<b>Indicación de la balanza</b>	<b>Temperatura ambiente</b>	<b>Presión atmosférica</b>
	<b>kg</b>	<b>kg</b>	<b>°C</b>	<b>mbar/abs</b>
1	0	0.00	23.5	1008.0
2	5	5.00	23.5	1008.0
3	10	10.00	23.5	1008.0
4	15	15.00	23.5	1008.0
5	20	20.00	23.5	1008.0
6	25	25.00	23.5	1008.0
7	30	30.00	23.5	1008.0
8	35	35.00	23.5	1008.0
9	40	40.00	23.5	1008.0
10	45	45.00	23.5	1008.0
11	50	50.00	23.5	1008.0
12	55	55.00	23.5	1008.0
13	60	60.05	23.5	1008.0
14	70	70.05	23.5	1008.0
15	80	80.00	23.5	1008.0

**Tabla 4 - Datos experimentales: carga descendente**

<b>Carga Descendente</b>				
<b>Número de puntos experimentales</b>	<b>Masa patrón</b>	<b>Indicación de la balanza</b>	<b>Temperatura ambiente</b>	<b>Presión atmosférica</b>
	<b>kg</b>	<b>kg</b>	<b>°C</b>	<b>mbar/abs</b>
1	0	0.00	23.5	1008.0
2	5	5.00	23.5	1008.0
3	10	10.00	23.5	1008.0
4	15	15.00	23.5	1008.0
5	20	20.00	23.5	1008.0
6	25	25.00	23.5	1008.0
7	30	30.00	23.5	1008.0
8	35	35.00	23.5	1008.0
9	40	40.00	23.5	1008.0
10	45	45.00	23.5	1008.0
11	50	50.00	23.5	1008.0
12	55	55.00	23.5	1008.0
13	60	60.05	23.5	1008.0
14	70	70.05	23.5	1008.0
15	80	80.00	23.5	1008.0

Como se observa en las tablas anteriores, el error por histéresis es igual a cero lo que caracteriza la estabilidad de carga en la báscula. Detalles de los resultados producto de la calibración experimental en el local de uso de la balanza son mostrados en las secciones subsecuentes.

#### 4.1.2 Báscula ICM

Esta balanza es utilizada para el proceso de pesaje de perfiles metálicos hasta 100 kg. La Tabla 5 presenta las características técnicas de la báscula y, la Figura 4, ilustra dicho instrumento de pesaje.

**Tabla 5** – Características de la báscula ICM

Datos del Instrumento	
<b>Ubicación</b>	Suseinco
<b>Clasificación</b>	Media (III)
<b>Fabricante</b>	ICM
<b>Modelo</b>	TCS-K1
<b>Número de serie</b>	No indica
<b>Carga máxima</b>	0 a 100 kg
<b>Resolución</b>	0,05 kg



**Figura 4** – Báscula ICM

Fuente: Elaboración propia

En el curso de los experimentos fueron obtenidos 30 puntos experimentales (15 para carga ascendente y 15 para carga descendente). La Figura 5 ilustra el proceso experimental para la situación de 30 kg de masa certificadas en la balanza de estudio y, la Figura 6, muestra la situación para una masa de 80 kg.



**Figura 5** - Procedimiento experimental para 30 kg de masa nominal

Fuente: Elaboración propia



**Figura 6** - Procedimiento experimental para 80 kg de masa nominal

Fuente: Elaboración propia

Las Tablas 6 y 7 detallan los datos experimentales obtenidos, para la situación de carga ascendente y descendente, respectivamente:

**Tabla 6 – Datos experimentales: carga ascendente**

<b>Carga Ascendente</b>				
<b>Número de puntos experimentales</b>	<b>Masa patrón</b>	<b>Indicación de la balanza</b>	<b>Temperatura ambiente</b>	<b>Presión atmosférica</b>
	<b>kg</b>	<b>kg</b>	<b>°C</b>	<b>mbar/abs</b>
1	0	0.00	23.5	1008.0
2	10	10.00	23.5	1008.0
3	20	20.01	23.5	1008.0
4	30	30.01	23.5	1008.0
5	40	40.02	23.5	1008.0
6	50	50.02	23.5	1008.0
7	60	60.03	23.5	1008.0
8	70	70.04	23.5	1008.0
9	72	72.02	23.5	1008.0
10	74	74.04	23.5	1008.0
11	76	76.05	23.5	1008.0
12	78	78.05	23.5	1008.0
13	80	80.05	23.5	1008.0
14	90	90.06	23.5	1008.0
15	100	100.07	23.5	1008.0

**Tabla 7 - Datos experimentales: carga descendente**

<b>Carga Descendente</b>				
<b>Número de puntos experimentales</b>	<b>Masa patrón</b>	<b>Indicación de la balanza</b>	<b>Temperatura ambiente</b>	<b>Presión atmosférica</b>
	<b>kg</b>	<b>kg</b>	<b>°C</b>	<b>mbar/abs</b>
1	0	0.00	23.5	1008.0
2	10	10.00	23.5	1008.0
3	20	20.01	23.5	1008.0
4	30	30.01	23.5	1008.0
5	40	40.02	23.5	1008.0
6	50	50.02	23.5	1008.0
7	60	60.03	23.5	1008.0
8	70	70.04	23.5	1008.0
9	72	72.02	23.5	1008.0
10	74	74.04	23.5	1008.0
11	76	76.05	23.5	1008.0
12	78	78.05	23.5	1008.0
13	80	80.05	23.5	1008.0
14	90	90.06	23.5	1008.0
15	100	100.07	23.5	1008.0

Como se observa en las tablas anteriores, el error por histéresis es igual a cero lo que caracteriza la estabilidad de carga en la báscula. Detalles de los resultados producto de la calibración experimental en el local de uso de la balanza son mostrados en las secciones subsecuentes.

## 4.2 Cálculo de la incertidumbre expandida asociada a la medición de masa

Este capítulo presenta los resultados analíticos productos de los experimentos realizados en cada una de las básculas, cuya confiabilidad metrológica es objeto de estudio en el presente proyecto de investigación.

Para un mejor entendimiento de las tablas presentadas en el presente capítulo, a continuación se describe cada uno de los términos utilizados y las ecuaciones aplicadas para la obtención de cada parámetro calculado:

- La columna que relaciona el **Patrón** muestra la masa nominal que se está colocando en la plataforma de la báscula, junto con la incertidumbre de medición que está asociada a las masas patrón. El cálculo de estas incertidumbres asociadas, según la combinación de masas, se realizó bajo los parámetros descritos en la ISO GUM (2008).
- La columna que relaciona la **Balanza** nos indica (i) la masa, la cual corresponde a la lectura que arroja la balanza de acuerdo a la masa patrón que es colocada en la plataforma; (ii) la masa aparente, la cual es calculada aplicando la ecuación (7); (iii) la incertidumbre de la masa aparente, que es calculada a partir de la siguiente expresión:

$$\left(\frac{u_{map}}{m_{ap}}\right)^2 = \left(\frac{u_{mo}}{m_o}\right)^2 + \left(\frac{u_{ar}}{\rho_{ar} - \rho_o}\right)^2 \quad (7)$$

En la expresión anterior:

$u_{map}$ : Incertidumbre asociada a la masa aparente;

$m_{ap}$ : Masa aparente;

$u_{mo}$ : Incertidumbre asociada a la masa del objeto;

- $m_o$ : Masa del objeto;  
 $u_{ar}$ : Incertidumbre asociada a la masa del aire;  
 $\rho_{ar}$ : Masa específica del aire;  
 $\rho_o$ : Masa específica del objeto.

- La columna relacionada con la **Temperatura ambiente**. La incertidumbre asociada a la medición de la temperatura ambiente puede ser obtenida dividiéndose la incertidumbre expandida ( $U = 0,49 \text{ }^\circ\text{C}$ ) por dos, para asociar esta resolución a una distribución normal de probabilidad. De esta forma, se obtiene un valor de incertidumbre de  $0,25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Este valor es constante para cualquier valor de temperatura indicado en un intervalo de confianza de 95,45%.
- La columna relacionada a la **Presión atmosférica** denota el valor medido con el sensor de presión (barómetro). La incertidumbre asociada a la medición de la presión atmosférica puede ser obtenida dividiéndose la resolución del instrumento ( $r = 0,1 \text{ mbar/abs}$ ) por la raíz de tres, para asociar esta resolución a una distribución rectangular de probabilidad. De esta forma, se obtiene un valor de incertidumbre de  $0,058 \text{ mbar/abs}$ . Este valor es constante para cualquier valor de presión atmosférica medido para un intervalo de confianza de 95%.
- Finalmente, con los valores obtenidos de las mediciones de temperatura ambiente y presión atmosférica en cada punto del experimento, se puede estimar la **densidad el aire (masa específica)** que circunda la masa patrón para cada uno de los puntos evaluados.
- Para tal propósito se aplica la siguiente expresión:

$$\rho_{ar} = \frac{P_{atm}}{R_{ar} \cdot T_{amb}} \quad (8)$$

En esta expresión:



- $\rho_{\text{ar}}$ : Masa específica del aire;
- $P_{\text{atm}}$ : Presión atmosférica;
- $R_{\text{ar}}$ : Constante universal del aire (287,0028 J/kg·K);
- $T_{\text{amb}}$ : Temperatura ambiente;

Con relación a la incertidumbre asociada a la masa específica, fue aplicado el principio de propagación de la incertidumbre de medición, principio este consagrado y establecidos en la ISO GUM (2008). De esa forma, los autores de presente proyecto de grado, dedujeron la siguiente expresión para realizar el cálculo de la incertidumbre asociada a la masa específica del aire, para una confiabilidad del 95%:

$$\left(\frac{u_{\rho_{\text{ar}}}}{\rho_{\text{ar}}}\right)^2 = \left(\frac{u_{P_{\text{atm}}}}{P_{\text{atm}}}\right)^2 + \left(\frac{u_{T_{\text{amb}}}}{T_{\text{amb}}}\right)^2 \quad (9)$$

En esta expresión:

- $u_{\rho_{\text{ar}}}$ : Incertidumbre asociada a la masa específica del aire;
- $\rho_{\text{ar}}$ : Masa específica del aire;
- $u_{P_{\text{atm}}}$ : Incertidumbre asociada a la presión atmosférica;
- $P_{\text{atm}}$ : Presión atmosférica;
- $u_{T_{\text{amb}}}$ : Incertidumbre asociada a la temperatura ambiente;
- $T_{\text{amb}}$ : Temperatura ambiente.

De donde:

$$u_{T_{\text{amb}}} = \frac{0,49^{\circ}\text{C}}{2} = 0,25^{\circ}\text{C} \quad (10)$$

$$u_{P_{\text{atm}}} = \frac{r}{\sqrt{3}} = \frac{0,1 \text{ mbar/abs}}{\sqrt{3}} = 0,058 \text{ mbar/abs} \quad (11)$$

El valor de la incertidumbre expandida correspondiente al termohigrómetro utilizado en los experimentos para la medición de la temperatura ambiente, corresponde a 0,49 °C (k=2).

### 4.2.1 Análisis de incertidumbre para la báscula Lexus

La Tabla 8 muestra los resultados relacionados a la relación de gravedad y el factor de empuje. Posteriormente, estos datos fueron utilizados para el cálculo de la masa aparente.

**Tabla 8** – Relación de aceleración de gravedad y factor de empuje

Parámetro	Símbolo	Local de fabricación / Local de calibración	Valor numérico	Unidad
Aceleración de gravedad de referencia	$g_{ref}$	Medellín (Colombia)	9,776180195	m/s <sup>2</sup>
Aceleración de gravedad del local de calibración	$g_{Baq}$	Barranquilla (Colombia)	9,828620367	m/s <sup>2</sup>
Relación de aceleración de gravedad	$g_{Baq} / g_{ref}$	-	1,005364076	-
Masa específica del objeto	$\rho_{masa}$	-	8000	kg/m <sup>3</sup>
Masa específica del aire	$\rho_{ar}$	-	1,180712744	kg/m <sup>3</sup>
Factor de empuje	$1 - \rho_{ar} / \rho_{masa}$	-	0,999852411	-

**Fuente:** Los valores de la aceleración de la gravedad local fueron obtenidos a través del siguiente enlace: <http://www.metas.com.mx/utilerias/calculoacelgravedad.php> Fecha de acceso: 01 de abril de 2021.

Las Tablas 9 (carga ascendente) y 10 (carga descendente) muestran los resultados de la calibración para los 30 puntos experimentales obtenidos:

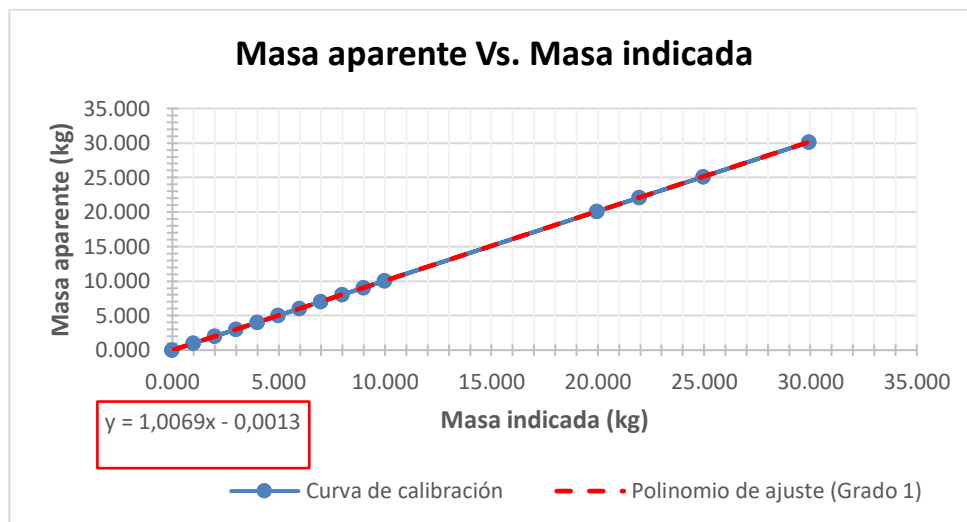
**Tabla 9 – Calibración báscula Lexus (carga ascendente)**

Carga Ascendente												
Puntos	Patrón		Balanza				Temperatura ambiente		Presión atmosférica		Masa específica del aire	
	Masa nominal	Incertidumbre (u)	Masa indicada	Masa aparente	Incertidumbre masa aparente	Indicado - aparente	Indicada	Incertidumbre	Indicación barómetro	Incertidumbre	Indicado	Incertidumbre
	kg	kg	kg	kg	kg	kg	°C	°C	mbar/abs	mbar/abs	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
1	0	0.00000	0.000	0.000	0.000000	0.000	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
2	5	0.0000085	5.000	5.026	0.000011	-0.026	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
3	10	0.000017	10.000	10.052	0.000021	-0.052	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
4	15	0.000019	15.000	15.078	0.000026	-0.078	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
5	20	0.000023	20.000	20.104	0.000034	-0.104	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
6	25	0.000042	25.000	25.130	0.000052	-0.130	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
7	30	0.000042	30.000	30.156	0.000056	-0.156	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
8	35	0.000045	35.000	35.183	0.000062	-0.183	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
9	40	0.000045	40.000	40.209	0.000067	-0.209	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
10	45	0.000048	45.000	45.235	0.000073	-0.235	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
11	50	0.000048	50.000	50.261	0.000078	-0.261	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
12	55	0.000017	55.000	55.287	0.000018	-0.287	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
13	60	0.000017	60.050	60.313	0.000018	-0.263	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
14	70	0.000017	70.050	70.365	0.000019	-0.315	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
15	80	0.000017	80.000	80.417	0.000020	-0.417	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010

**Tabla 10 - Calibración báscula Lexus (carga descendente)**

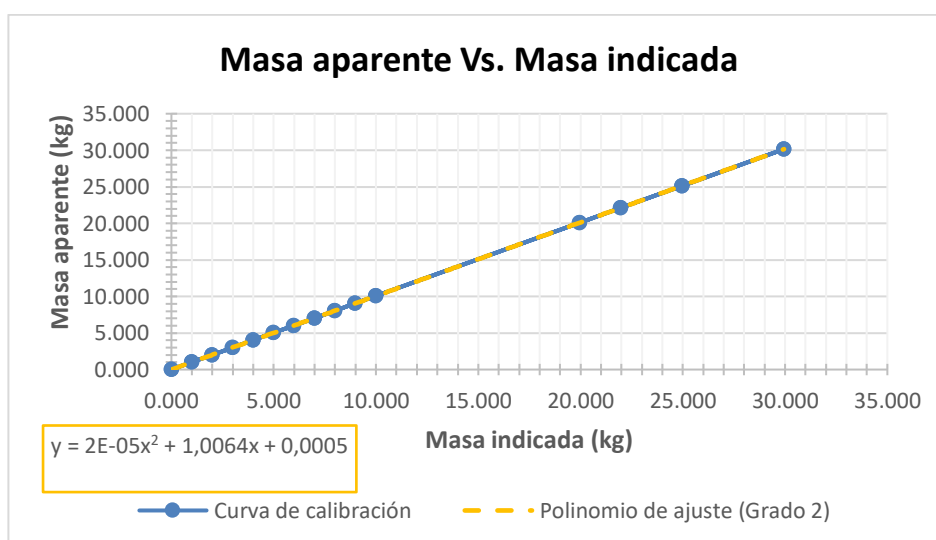
Carga Descendente												
Puntos	Patrón		Balanza				Temperatura ambiente		Presión atmosférica		Masa específica del aire	
	Masa nominal	Incertidumbre (u)	Masa indicada	Masa aparente	Incertidumbre masa aparente	Indicado - aparente	Indicada	Incertidumbre	Indicación barómetro	Incertidumbre	Indicado	Incertidumbre
	kg	kg	kg	kg	kg	kg	°C	°C	mbar/abs	mbar/abs	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
1	0	0.00000	0.000	0.000	0.000000	0.000	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
2	5	0.0000085	5.000	5.026	0.000011	-0.026	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
3	10	0.000017	10.000	10.052	0.000021	-0.052	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
4	15	0.000019	15.000	15.078	0.000026	-0.078	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
5	20	0.000023	20.000	20.104	0.000034	-0.104	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
6	25	0.000042	25.000	25.130	0.000052	-0.130	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
7	30	0.000042	30.000	30.156	0.000056	-0.156	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
8	35	0.000045	35.000	35.183	0.000062	-0.183	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
9	40	0.000045	40.000	40.209	0.000067	-0.209	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
10	45	0.000048	45.000	45.235	0.000073	-0.235	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
11	50	0.000048	50.000	50.261	0.000078	-0.261	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
12	55	0.000017	55.000	55.287	0.000018	-0.287	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
13	60	0.000017	60.050	60.313	0.000018	-0.263	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
14	70	0.000017	70.050	70.365	0.000019	-0.315	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
15	80	0.000017	80.000	80.417	0.000020	-0.417	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010

Aplicándose el método de los mínimos cuadrados ordinarios para establecer el polinomio que mejor ajusta los datos experimentales, se obtuvieron cuatro curvas de calibración, las cuales son ilustradas en la Figuras 7 a 10:



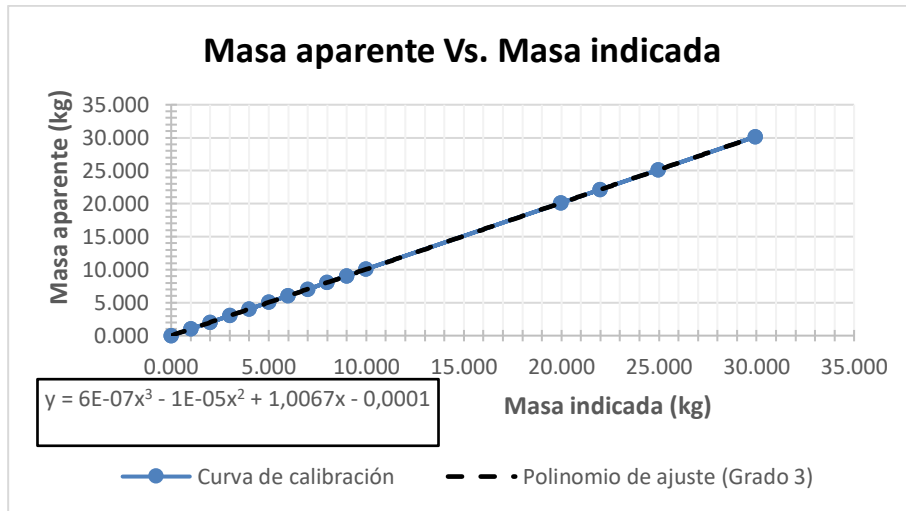
**Figura 7** – Curva de calibración báscula Lexus (polinomio de grado 1)

Fuente: Elaboración propia



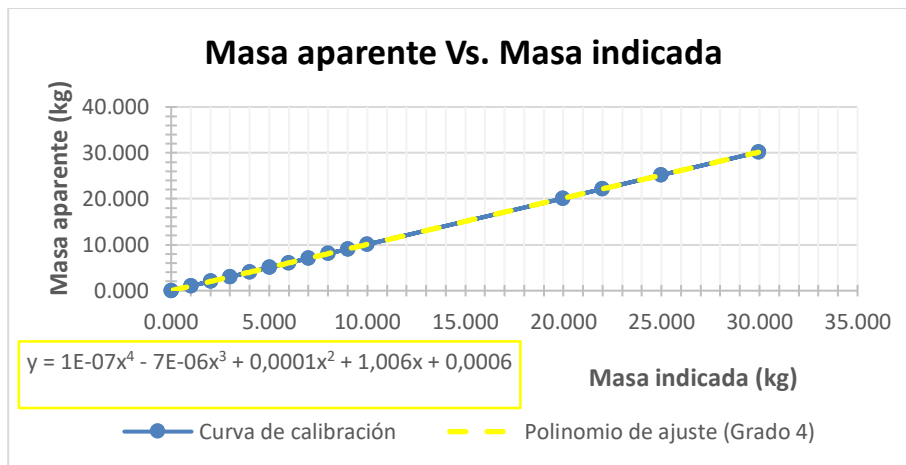
**Figura 8** – Curva de calibración báscula Lexus (polinomio de grado 2)

Fuente: Elaboración propia



**Figura 9** – Curva de calibración báscula Lexus (polinomio de grado 3)

Fuente: Elaboración propia



**Figura 10** – Curva de calibración báscula Lexus (polinomio de grado 4)

Fuente: Elaboración propia

La incertidumbre de ajuste ( $u_s$ ) fue calculada para cada uno de las curvas de calibración obtenida. Los resultados son presentados en la Tabla 11:

**Tabla 11** – Cálculo de la desviación media cuadrática (incertidumbre de ajuste)

Incertidumbre de ajuste ( $u_s$ )			
Grado 1	Grado 2	Grado 3	Grado 4
0.0878	0.1203	1.2047	0.2760

Como se puede observar en la tabla anterior, el polinomio que modela de mejor manera los datos experimentales obtenidos para la báscula Lexus, corresponde a un polinomio de grado 1, debido a que es el que ofrece menor desviación media cuadrática. De este modo, la ecuación de ajuste correspondiente está dada por la siguiente expresión:

$$y = 1,0069x + 0,0013 \quad (12)$$

donde:

y: denota el valor de la masa ajustada (kg);

x: denota el valor de masa indicada por la balanza (kg).

Por último, fue posible encontrar valor de la masa ajustado para cada punto del experimento obtenido con la incertidumbre expandida (U) relacionada a la medición de masa. Este valor de incertidumbre fue estimado para un factor de cobertura  $k=2$ , es decir, para una confiabilidad de 95,45%. Las fuentes de incertidumbre consideradas fueron: (i) incertidumbre de ajuste,  $u_s$ ; (ii) incertidumbre de las masas patrón,  $u_p$ ; (iii) incertidumbre del instrumento,  $u_{Inst}$ .

La incertidumbre expandida (U) para cada punto experimental fue calculada a partir de la Ecuación (13):

$$U = u \cdot k \quad (13)$$

donde:

$$u^2 = u_s^2 + u_p^2 + u_{Inst}^2 \quad (14)$$

La incertidumbre del instrumento,  $u_{Inst}$ , puede ser evaluada a partir de la Ecuación (15):

$$u_{Inst} = \left( \frac{r}{\sqrt{3}} \right) \quad (15)$$

En las ecuaciones 12, 13 y 14:

**U:** denota la incertidumbre expandida asociada a la medición de masa con 95,45% de confianza (kg);

**k:** denota el factor de cobertura, *i.e.*:  $k=2$  para 95,45% de confianza;

**u:** denota la incertidumbre asociada a la medición de masa con 68,2% de confianza (kg), es decir, incertidumbre patrón;

**$u_s$ :** denota la incertidumbre de ajuste (kg);

**$u_p$ :** denota la incertidumbre de las masas patrón utilizadas (kg);

**$u_{inst}$ :** denota la incertidumbre de instrumento (balanza) (kg);

**r:** resolución de la balanza, *i.e.*: 0,05 kg

La Tabla 12 presenta los resultados finales de la calibración correspondiente a la báscula Lexus utilizada por la empresa suseinco.



**Tabla 12 – Resultado final de la calibración (Báscula Lexus)**

	Puntos	RESULTADO FINAL						
		Masa Indicada	Masa ajustada	Incertidumbre de ajuste	Incertidumbre del patrón	Incertidumbre del instrumento	Incertidumbre ajustada (u)	Incertidumbre Expandida (U)
		kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
CARGA ASCENDENTE	1	0.00	0.00	0.0878	0.00000	0.0011	0.0878	<b>0.18</b>
	2	5.00	5.01	0.0878	0.0000085	0.0011	0.0878	<b>0.18</b>
	3	10.00	10.01	0.0878	0.0000017	0.0011	0.0878	<b>0.18</b>
	4	15.00	15.01	0.0878	0.0000019	0.0011	0.0878	<b>0.18</b>
	5	20.00	20.01	0.0878	0.0000023	0.0011	0.0878	<b>0.18</b>
	6	25.00	25.01	0.0878	0.0000042	0.0011	0.0878	<b>0.18</b>
	7	30.00	30.00	0.0878	0.0000042	0.0011	0.0878	<b>0.18</b>
	8	35.00	34.99	0.0878	0.0000045	0.0011	0.0878	<b>0.18</b>
	9	40.00	39.99	0.0878	0.0000045	0.0011	0.0878	<b>0.18</b>
	10	45.00	45.00	0.0878	0.0000048	0.0011	0.0878	<b>0.18</b>
	11	50.00	50.03	0.0878	0.0000048	0.0011	0.0878	<b>0.18</b>
	12	55.00	55.09	0.0878	0.000017	0.0011	0.0878	<b>0.18</b>
	13	60.05	60.23	0.0878	0.000017	0.0011	0.0878	<b>0.18</b>
	14	70.05	70.59	0.0878	0.000017	0.0011	0.0878	<b>0.18</b>
	15	80.00	81.20	0.0878	0.000017	0.0011	0.0878	<b>0.18</b>
CARGA DESCENDENTE	16	0.00	0.00	0.0878	0.0000000	0.0011	0.088	<b>0.18</b>
	17	5.00	5.01	0.0878	0.0000009	0.0011	0.088	<b>0.18</b>
	18	10.00	10.01	0.0878	0.0000017	0.0011	0.088	<b>0.18</b>
	19	15.00	15.01	0.0878	0.0000019	0.0011	0.088	<b>0.18</b>
	20	20.00	20.01	0.0878	0.0000023	0.0011	0.088	<b>0.18</b>
	21	25.00	25.01	0.0878	0.0000042	0.0011	0.088	<b>0.18</b>
	22	30.00	30.00	0.0878	0.0000042	0.0011	0.088	<b>0.18</b>
	23	35.00	34.99	0.0878	0.0000045	0.0011	0.088	<b>0.18</b>
	24	40.00	39.99	0.0878	0.0000045	0.0011	0.088	<b>0.18</b>
	25	45.00	45.00	0.0878	0.0000048	0.0011	0.088	<b>0.18</b>
	26	50.00	50.03	0.0878	0.0000048	0.0011	0.088	<b>0.18</b>
	27	55.00	55.09	0.0878	0.000017	0.0011	0.088	<b>0.18</b>
	28	60.05	60.23	0.0878	0.000017	0.0011	0.088	<b>0.18</b>
	29	70.05	70.59	0.0878	0.000017	0.0011	0.088	<b>0.18</b>
	30	80.00	81.20	0.0878	0.000017	0.0011	0.088	<b>0.18</b>

La anterior tabla nos indica que la incertidumbre relacionada a la medición de masa cuando se utiliza la báscula Lexus, es de 0,18 kg en todo el rango de medición del instrumento, arrojando un nivel de confianza de 95,45%.

#### 4.2.2 Análisis de incertidumbre para la báscula ICM

La Tabla 13 muestra los resultados relacionados a la relación de gravedad y el factor de empuje. Posteriormente, estos datos fueron utilizados para el cálculo de la masa aparente.

**Tabla 13** – Relación de aceleración de gravedad y factor de empuje

Parámetro	Símbolo	Local de fabricación / Local de calibración	Valor numérico	Unidad
Aceleración de gravedad de referencia	$g_{ref}$	Medellín (Colombia)	9,776180195	m/s <sup>2</sup>
Aceleración de gravedad del local de calibración	$g_{Baq}$	Puerto Colombia (Colombia)	9,828620367	m/s <sup>2</sup>
Relación de aceleración de gravedad	$g_{Baq} / g_{ref}$	-	1,005364076	-
Masa específica del objeto	$\rho_{masa}$	-	8000	kg/m <sup>3</sup>
Masa específica del aire	$\rho_{ar}$	-	1,180712744	kg/m <sup>3</sup>
Factor de empuje	$1 - \rho_{ar} / \rho_{masa}$	-	0,999852411	-

**Fuente:** Los valores de la aceleración de la gravedad local fueron obtenidos a través del siguiente enlace: <http://www.metas.com.mx/utilerias/calculoacelgravedad.php> Fecha de acceso: 01 de abril de 2021.

Las Tablas 14 (carga ascendente) y 15 (carga descendente) muestran los resultados de la calibración para los 30 puntos experimentales obtenidos:

**Tabla 14 – Calibración báscula ICM (carga ascendente)**

Carga Ascendente												
Puntos	Patrón		Balanza				Temperatura ambiente		Presión atmosférica		Masa específica del aire	
	Masa nominal	Incertidumbre (u)	Masa indicada	Masa aparente	Incertidumbre masa aparente	Indicado - aparente	Indicada	Incertidumbre	Indicación barómetro	Incertidumbre	Indicado	Incertidumbre
	kg	kg	kg	kg	kg	kg	°C	°C	mbar/abs	mbar/abs	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
1	0	0.00000	0.000	0.000	0.000000	0.000	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
2	10	0.0000085	10.000	10.052	0.000015	-0.052	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
3	20	0.000017	20.010	20.104	0.000030	-0.094	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
4	30	0.000019	30.010	30.156	0.000041	-0.146	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
5	40	0.000023	40.020	40.209	0.000055	-0.189	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
6	50	0.000042	50.020	50.261	0.000074	-0.241	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
7	60	0.000042	60.030	60.313	0.000085	-0.283	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
8	70	0.000045	70.040	70.365	0.000097	-0.325	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
9	72	0.000045	72.020	72.376	0.000100	-0.356	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
10	74	0.000048	74.040	74.386	0.000103	-0.346	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
11	76	0.000048	76.050	76.396	0.000105	-0.346	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
12	78	0.000017	78.050	78.407	0.000019	-0.357	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
13	80	0.000017	80.050	80.417	0.000019	-0.367	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
14	90	0.000017	90.060	90.469	0.000020	-0.409	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
15	100	0.000017	100.070	100.522	0.000021	-0.452	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010

Tabla 15 - Calibración báscula ICM (carga descendente)

Carga Descendente												
Puntos	Patrón		Balanza				Temperatura ambiente		Presión atmosférica		Masa específica del aire	
	Masa nominal	Incertidumbre (u)	Masa indicada	Masa aparente	Incertidumbre masa aparente	Indicado - aparente	Indicada	Incertidumbre	Indicación barómetro	Incertidumbre	Indicado	Incertidumbre
	kg	kg	kg	kg	kg	kg	°C	°C	mbar/abs	mbar/abs	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
1	0	0.00000	0.000	0.000	0.000000	0.000	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
2	10	0.0000085	10.000	10.052	0.0000015	-0.052	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
3	20	0.0000017	20.010	20.104	0.0000030	-0.094	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
4	30	0.0000019	30.010	30.156	0.0000041	-0.146	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
5	40	0.0000023	40.020	40.209	0.0000055	-0.189	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
6	50	0.0000042	50.020	50.261	0.0000074	-0.241	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
7	60	0.0000042	60.030	60.313	0.0000085	-0.283	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
8	70	0.0000045	70.040	70.365	0.0000097	-0.325	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
9	72	0.0000045	72.020	72.376	0.0000100	-0.356	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
10	74	0.0000048	74.040	74.386	0.0000103	-0.346	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
11	76	0.0000048	76.050	76.396	0.0000105	-0.346	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
12	78	0.0000017	78.050	78.407	0.0000019	-0.357	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
13	80	0.0000017	80.050	80.417	0.0000019	-0.367	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
14	90	0.0000017	90.060	90.469	0.0000020	-0.409	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010
15	100	0.0000017	100.070	100.522	0.0000021	-0.452	23.5	0.25	1008.0	0.058	1.184	0.0010

Aplicándose el método de los mínimos cuadrados ordinarios para establecer el polinomio que mejor ajusta los datos experimentales, se obtuvieron cuatro curvas de calibración, las cuales son ilustradas en la Figuras 11 a 14:

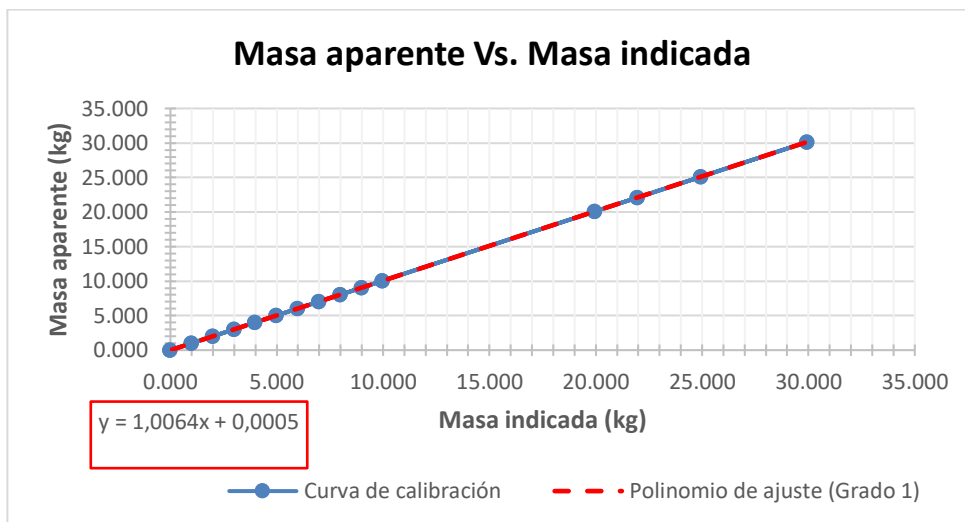


Figura 11 – Curva de calibración báscula ICM (polinomio de grado 1)

Fuente: Elaboración propia

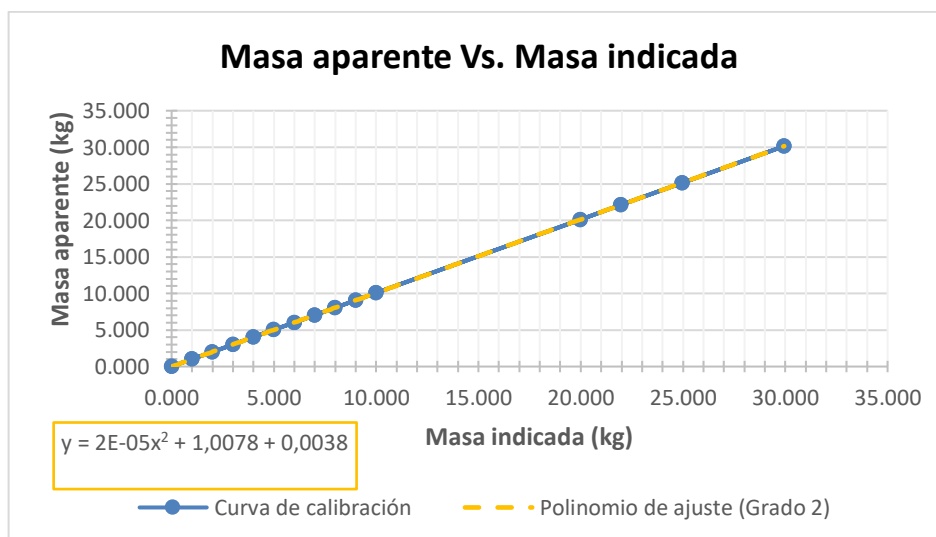
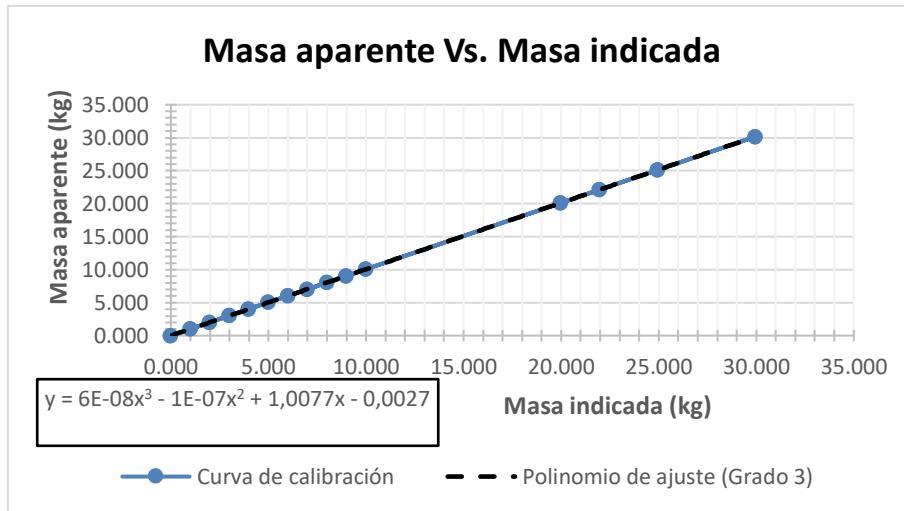


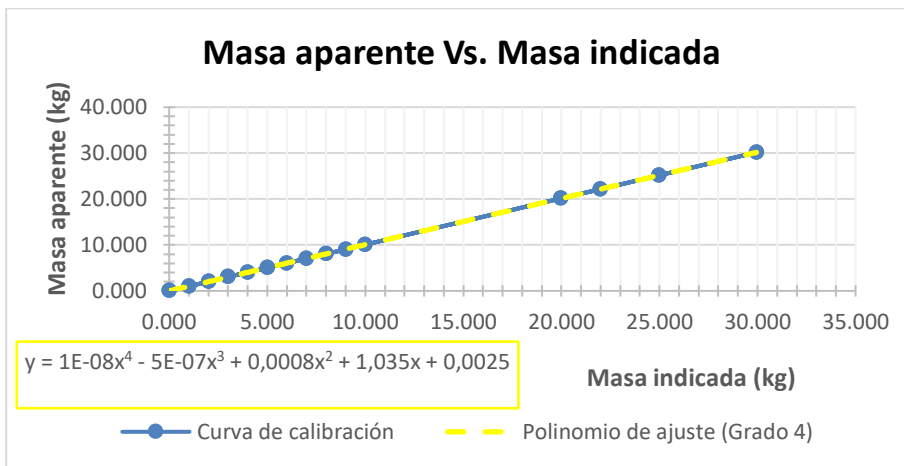
Figura 12 – Curva de calibración báscula ICM (polinomio de grado 2)

Fuente: Elaboración propia



**Figura 13** – Curva de calibración báscula ICM (polinomio de grado 3)

Fuente: Elaboración propia



**Figura 14** – Curva de calibración báscula ICM (polinomio de grado 4)

Fuente: Elaboración propia

La incertidumbre de ajuste ( $u_s$ ) fue calculada para cada uno de las curvas de calibración obtenida. Los resultados son presentados en la Tabla 16:

**Tabla 16** – Cálculo de la desviación media cuadrática (incertidumbre de ajuste)

Incertidumbre de ajuste ( $u_s$ )			
Grado 1	Grado 2	Grado 3	Grado 4
0.1512	0.2252	2.8211	1.2232

Como se puede observar en la tabla anterior, el polinomio que modela de mejor manera los datos experimentales obtenidos para la báscula ICM, corresponde a un polinomio de grado 1, debido a que es el que ofrece menor desviación media cuadrática. De este modo, la ecuación de ajuste correspondiente está dada por la siguiente expresión:

$$y = 1,0064x + 0,0005 \quad (16)$$

donde:

y: denota el valor de la masa ajustada (kg);

x: denota el valor de masa indicada por la balanza (kg).

Finalmente, fue posible determinar el valor de masa ajustado para cada punto experimental obtenido junto con la incertidumbre expandida (U) asociada a la medición de masa. Este valor de incertidumbre fue estimado para un factor de cobertura  $k=2$ , es decir, para una confiabilidad de 95,45%. Las fuentes de incertidumbre consideradas fueron: (i) incertidumbre de ajuste,  $u_s$ ; (ii) incertidumbre de las masas patrón,  $u_p$ ; (iii) incertidumbre del instrumento,  $u_{Inst}$ .

La incertidumbre expandida (U) para cada punto experimental fue calculada a partir de la Ecuación (17):

$$U = u \cdot k \quad (17)$$

donde:

$$u^2 = u_s^2 + u_p^2 + u_{Inst}^2 \quad (18)$$

La incertidumbre del instrumento,  $u_{Inst}$ , puede ser evaluada a partir de la Ecuación (19):

$$u_{Inst} = \left( \frac{r}{\sqrt{3}} \right) \quad (19)$$

En las ecuaciones 12, 13 y 14:

**U:** denota la incertidumbre expandida asociada a la medición de masa con 95,45% de confianza (kg);

**k:** denota el factor de cobertura, *i.e.*:  $k=2$  para 95,45% de confianza;

**u:** denota la incertidumbre asociada a la medición de masa con 68,2% de confianza (kg), es decir, incertidumbre patrón;

**u<sub>s</sub>:** denota la incertidumbre de ajuste (kg);

**u<sub>p</sub>:** denota la incertidumbre de las masas patrón utilizadas (kg);

**u<sub>inst</sub>:** denota la incertidumbre de instrumento (balanza) (kg);

**r:** resolución de la balanza, *i.e.*: 0,05 kg

La Tabla 17 presenta los resultados finales de la calibración correspondiente a la báscula ICM utilizada en la empresa suseinco.



**Tabla 17 – Resultado final de la calibración (báscula ICM)**

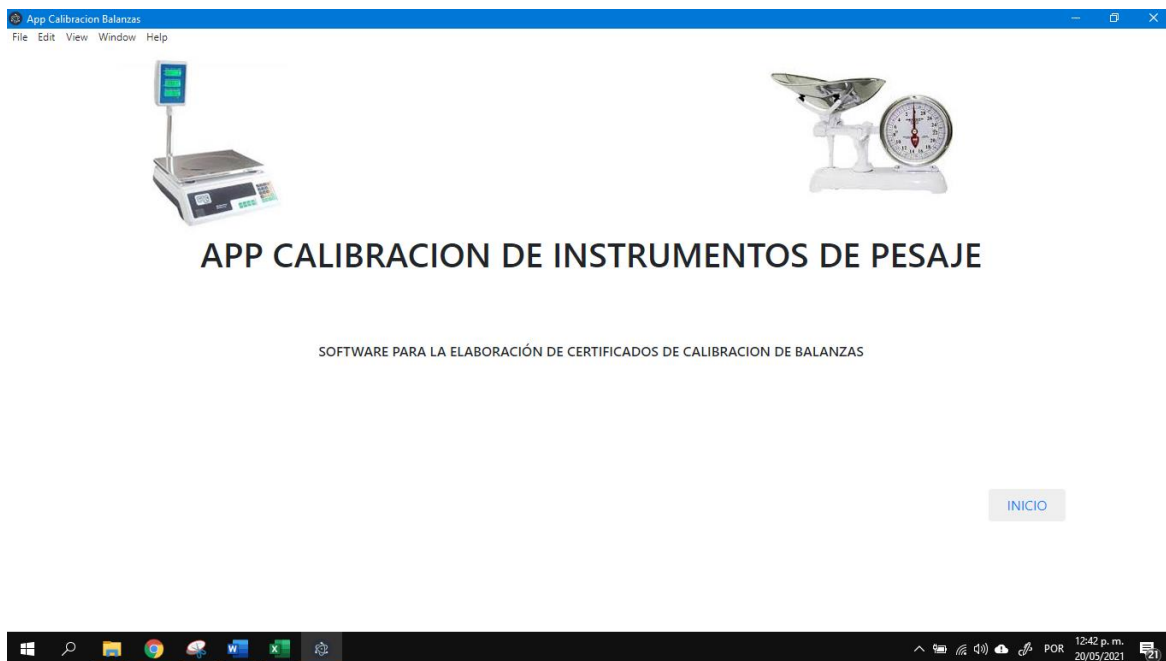
	Puntos	RESULTADO FINAL						
		Masa Indicada	Masa ajustada	Incertidumbre de ajuste	Incertidumbre del patrón	Incertidumbre del instrumento	Incertidumbre ajustada (u)	Incertidumbre Expandida (U)
		kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
<b>CARGA ASCENDENTE</b>	<b>1</b>	0.00	0.00	0.1512	0.000000	0.0011	0.1512	<b>0.30</b>
	<b>2</b>	10.00	10.01	0.1512	0.00000085	0.0011	0.1512	<b>0.30</b>
	<b>3</b>	20.01	20.02	0.1512	0.0000017	0.0011	0.1512	<b>0.30</b>
	<b>4</b>	30.01	30.01	0.1512	0.0000019	0.0011	0.1512	<b>0.30</b>
	<b>5</b>	40.02	40.01	0.1512	0.0000023	0.0011	0.1512	<b>0.30</b>
	<b>6</b>	50.02	50.05	0.1512	0.0000042	0.0011	0.1512	<b>0.30</b>
	<b>7</b>	60.03	60.21	0.1512	0.0000042	0.0011	0.1512	<b>0.30</b>
	<b>8</b>	70.04	70.57	0.1512	0.0000045	0.0011	0.1512	<b>0.30</b>
	<b>9</b>	72.02	72.66	0.1512	0.0000045	0.0011	0.1512	<b>0.30</b>
	<b>10</b>	74.04	74.80	0.1512	0.0000048	0.0011	0.1512	<b>0.30</b>
	<b>11</b>	76.05	76.94	0.1512	0.0000048	0.0011	0.1512	<b>0.30</b>
	<b>12</b>	78.05	79.09	0.1512	0.000017	0.0011	0.1512	<b>0.30</b>
	<b>13</b>	80.05	81.25	0.1512	0.000017	0.0011	0.1512	<b>0.30</b>
	<b>14</b>	90.06	92.39	0.1512	0.000017	0.0011	0.1512	<b>0.30</b>
	<b>15</b>	100.07	104.15	0.1512	0.000017	0.0011	0.1512	<b>0.30</b>
<b>CARGA DESCENDENTE</b>	<b>16</b>	0.00	0.00	0.1512	0.0000000	0.0011	0.151	<b>0.30</b>
	<b>17</b>	10.00	10.01	0.1512	0.0000009	0.0011	0.151	<b>0.30</b>
	<b>18</b>	20.01	20.02	0.1512	0.0000017	0.0011	0.151	<b>0.30</b>
	<b>19</b>	30.01	30.01	0.1512	0.0000019	0.0011	0.151	<b>0.30</b>
	<b>20</b>	40.02	40.01	0.1512	0.0000023	0.0011	0.151	<b>0.30</b>
	<b>21</b>	50.02	50.05	0.1512	0.0000042	0.0011	0.151	<b>0.30</b>
	<b>22</b>	60.03	60.21	0.1512	0.0000042	0.0011	0.151	<b>0.30</b>
	<b>23</b>	70.04	70.57	0.1512	0.0000045	0.0011	0.151	<b>0.30</b>
	<b>24</b>	72.02	72.66	0.1512	0.0000045	0.0011	0.151	<b>0.30</b>
	<b>25</b>	74.04	74.80	0.1512	0.0000048	0.0011	0.151	<b>0.30</b>
	<b>26</b>	76.05	76.94	0.1512	0.0000048	0.0011	0.151	<b>0.30</b>
	<b>27</b>	78.05	79.09	0.1512	0.000017	0.0011	0.151	<b>0.30</b>
	<b>28</b>	80.05	81.25	0.1512	0.000017	0.0011	0.151	<b>0.30</b>
	<b>29</b>	90.06	92.39	0.1512	0.000017	0.0011	0.151	<b>0.30</b>
	<b>30</b>	100.07	104.15	0.1512	0.000017	0.0011	0.151	<b>0.30</b>

La anterior tabla nos indica que la incertidumbre relacionada a la medición de masa cuando se utiliza la báscula ICM, es de 0,30 kg en todo el rango de medición del instrumento, arrojando un nivel de confianza de 95,45%.

### 4.3 Desarrollo de un algoritmo computacional

Como valor agregador se desarrolló un software basado en un algoritmo computacional capaz de realizar el análisis y de los datos de calibración de la báscula en tiempo real, además de emitir un certificado de calibración conforme a las directrices definidas en la ISO 17025:2017.

La Figura 15 ilustra la pantalla de inicio de la herramienta informática desarrollada, cuyo algoritmo base de programación se encuentra en el Anexo A.



**Figura 15** – Pantalla de inicio

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se puede visualizar la pantalla que permite la caracterización metrológica del instrumento, así como datos del certificado de calibración. La Figura 16 ilustra esta opción.

App calibracion de balanzas

File Edit View Window Help

Home Link Inicio de SesiónRegistro

### CALIBRACION DE EQUIPOS DE PESAJE

No. Certificado	Instrumento	División de Escala usada solo si es Análoga
Solicitante	Fabricante	Carga Max
Dirección	Modelo	Unidad g
Lugar de Calibración	Serie	Tolerancia del Cliente
Fecha de Recepción dd/mm/aaaa	Id-Codigó	Masas a utilizar E2
Fecha de Calibración dd/mm/aaaa	División de Escala	Siguiente

Windows taskbar: 12:42 p. m. 20/05/2021

**Figura 16 – Información básica**

Fuente: Elaboración propia

La Figura 17 muestra la opción de incluir los datos relacionados a la prueba de excentricidad, así como repetibilidad y exactitud. Superada esta sección, es posible incluir la trazabilidad metrológica conforme se muestra en la Figura 18. Es decir, se pueden incluir cuales fueron los patrones utilizados en el proceso de calibración.

App calibración de balanzas

File Edit View Window Help

Home Link Inicio de Sesión Registro

### CALIBRACION DE EQUIPOS DE PESAJE

prueba de excentricidad

Carga de ensayo

Posicion	Indicacion
1	<input type="text"/>
2	<input type="text"/>
3	<input type="text"/>
4	<input type="text"/>
5	<input type="text"/>

Plato rectangular      Plato circular

NEED HELP?

Atras Siguiete:

Windows taskbar: 12:43 p.m. 20/05/2021

**Figura 17 – Prueba de excentricidad**

Fuente: Elaboración propia

App calibración de balanzas

File Edit View Window Help

Home Link Inicio de Sesión Registro

### CALIBRACION DE EQUIPOS DE PESAJE

Temperatura Ambiental Mínima (°C) 25

Temperatura Ambiental Maxima (°C) 25

Humedad Relativa Mínima (%Hr) 60

Humedad Relativa Mínima (%Hr) 60

Trazabilidad:

Juego de pesas M1

Metrólogo: Illich Maury

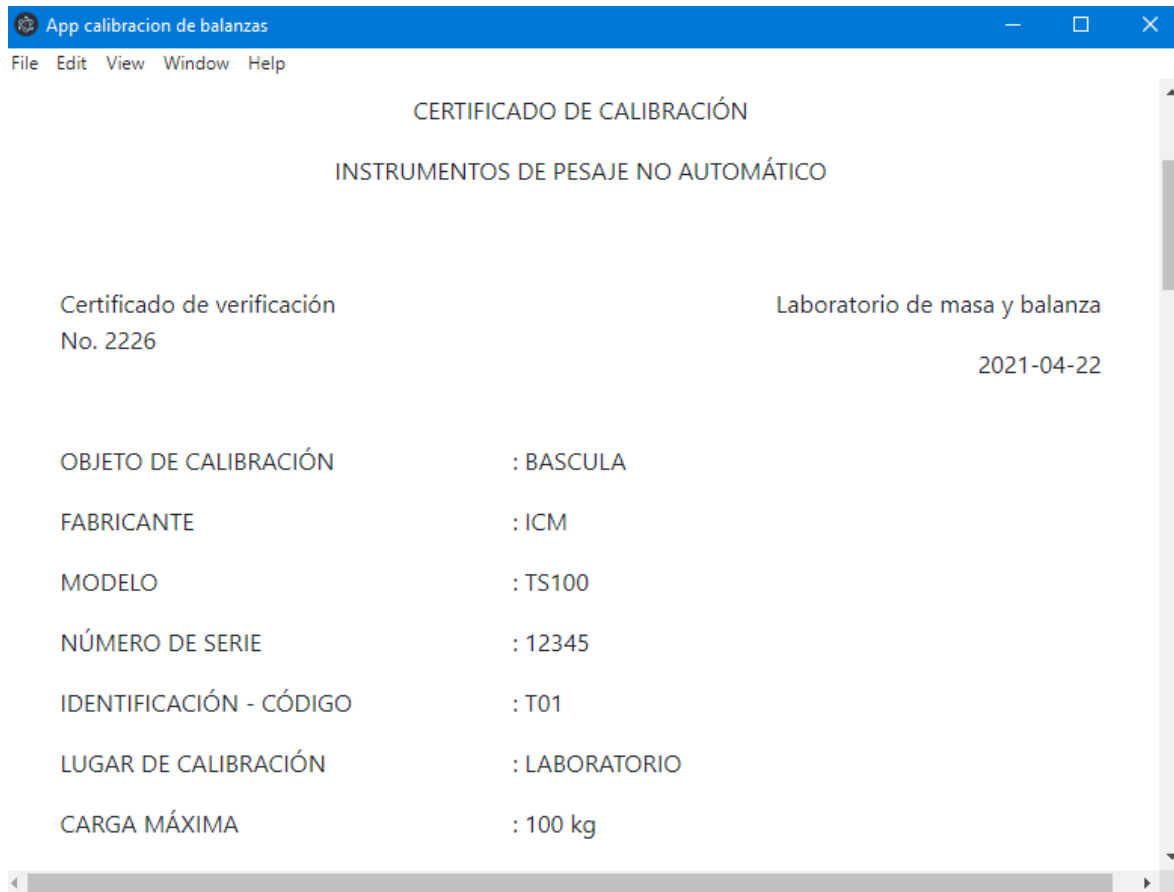
Atras Siguiete:

Windows taskbar: Área de trabajo de Windows Intl 12:43 p.m. 20/05/2021

**Figura 18 – Información sobre la trazabilidad metrológica**

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, es posible generar un archivo PDF con los datos del certificado de calibración y generar su impresión y guardar el archivo en el PC. Las Figuras 19 a 21 muestra el producto final de este software desarrollado con el fin de computarizar la información.



**Figura 19** – Formato de impresión

Fuente: Elaboración propia

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN  
INSTRUMENTOS DE PESAJE NO AUTOMÁTICO

Certificado de verificación No. 2226

Laboratorio de masa y balanza

2021-04-22

OBJETO DE CALIBRACIÓN : BASCULA  
FABRICANTE : ICM  
MODELO : TS100  
NÚMERO DE SERIE : 12345  
IDENTIFICACIÓN - CÓDIGO : T01  
LUGAR DE CALIBRACIÓN : LABORATORIO  
CARGA MÁXIMA : 100 kg  
RESOLUCIÓN : 1 kg  
CLIENTE : UAN  
DIRECCIÓN : PUERTO COLOMBIA  
FECHA DE RECEPCIÓN : 2021-05-12  
FECHA DE CALIBRACIÓN : 2021-05-12

Número de páginas del certificado 2

Calibrado por:

Illich Maury

Metrólogo

Sello

Este certificado sólo puede ser difundido completamente y sin modificaciones. Los extractos o modificaciones requieren la autorización del autor, Certificados sin firma carecen de validez.

Pág. 1 de 2

## Figura 20 – Certificado de calibración página 1

Fuente: Elaboración propia

Certificado de verificación No. 2226

Laboratorio de masa y balanza  
2021-04-22

Método de calibración

Las pesas patrones son colocadas sobre el receptor de carga de la balanza después de haber colocado el cero. Los valores indicados en la balanza son anotados en el formato. La calibración incluye las siguientes pruebas: Repetibilidad, exactitud y excentricidad. El método de calibración corresponde con lo indicado en la Guía SIM MWG7/cg-01/v.00: 2009, La temperatura ambiente existente en el sitio de calibración fue medida con termómetros calibrados y trazables.

Condiciones ambientales:

Temperatura: (25.00 ± 0,1)°C

Humedad relativa: (60.00 ± 1)%Hr

Trazabilidad : Juego de pesas M1

Incertidumbre de medida

La incertidumbre expandida de medición especificada arriba, se calculó multiplicando la incertidumbre de medida estándar con el factor de cobertura  $k = 2$ . Este valor ha sido determinado según la GUM y la guía SIM MWG7/cg-01/v.00: 2009. El valor medido de la magnitud se estima normalmente con una probabilidad de aproximadamente del 95,45 %.

Los resultados son válidos para el estado del objeto de calibración bajo las condiciones existentes en el momento de la calibración. En el cálculo no está contenida la estabilidad a largo plazo del objeto de calibración.

Observaciones

En el lugar de calibración se ha determinado la incertidumbre de medida de la balanza. En caso de lugares de emplazamiento distintos o con condiciones de entorno diferentes, se pueden producir incertidumbres de medidas distintas. El laboratorio de calibración guarda una copia de este certificado de calibración por lo menos cinco años.

Resultados de medición:

1. Repetibilidad

Mediciones No.	Carga 10 kg - 50 kg	
	Indicación	Indicación
1	10	50
2	10	50
3	10	50
4	10	50
5	10	50
6	9	50

Desviación estándar máxima (kg): 0.4082483

2. Excentricidad

Posición	Indicación (kg)	Error (kg)
1	30	/
2	30	0.00000
3	30	0.00000
4	30	0.00000
5	31	1.00000

$\Delta I_{exc,max} : 1.00000$

Cargas (kg)	Indicación (kg)	Error (kg)	Incertidumbre expandida (kg)
20	20	0.0000	1.22
40	40	0.0000	1.39
60	60	0.0000	1.63
80	80	0.0000	1.92
90	90	0.0000	2.08
100	100	0.0000	2.24

Fin del Informe

Pág. 2 de 2

Figura 21 – Certificado de calibración página 2

Fuente: Elaboración propia

## 5. Conclusiones y Recomendaciones

En relación con el primer objetivo específico – *Analizar la situación actual de los instrumentos de medición en la empresa SUSEINCO SAS*– se llevó a cabo mediante la aplicación de tres pruebas, excentricidad, repetitividad y linealidad. Sin embargo, se determinó que las mediciones arrojadas por el equipo presentaban una elevada desviación y un coeficiente de variación por encima de los valores permisibles. Por lo tanto, se requirió de un ajuste mediante el método de mínimos cuadrados para garantizar la confiabilidad de futuras mediciones. De esta forma los equipos quedaron a punto para continuar con el proceso de galvanizado en la empresa contribuyendo a un aumento de la confiabilidad metrológica.

Respecto al segundo objetivo específico – *Realizar la calibración de las básculas con patrones trazables a patrones internacionales con el fin de garantizar la confiabilidad de los resultados al sistema internacional de unidades* – mediante la aplicación del modelo se obtuvo una ecuación de ajuste de las mediciones obtenidas, que presenta una correlación representativa de los datos, por lo cual se garantiza la obtención de valores ajustados a la realidad y que brindan confiabilidad y precisión a los datos a obtener en las futuras mediciones con el equipo de pesaje.

Para el tercer objetivo específico – *Calcular la incertidumbre expandida asociada a la medición de masa, con el fin de comparar el desempeño metrológico de las básculas usando la prueba t-student*– una vez obtenido el modelo matemático mediante el método de mínimos cuadrados se obtuvo el ajuste de las mediciones. La incertidumbre asociada a la medición de masa cuando es utilizada la báscula Lexus, es 0,18 kg en todo el rango de medición del instrumento para un nivel de confianza de 95,45%. La incertidumbre asociada a la medición de masa cuando es



utilizada la báscula ICM, es 0,30 kg en todo el rango de medición del instrumento para un nivel de confianza de 95,45%.

Para el cuarto objetivo específico – *Desarrollar un algoritmo computacional que permita la generación de un certificado de calibración de las básculas en lugar de operación del proceso de galvanizado*– se realizó un software computacional capaz de realizar certificados de calibración en línea, lo que permitió disminuir los tiempos de verificación de los equipos por parte de la empresa suseinco, contribuyendo así, a un aumento de la confiabilidad metrológica de la medición de masa en el proceso de galvanizado de perfiles.

A partir de la experiencia aprendida y como desdoblamiento natural para futuras investigaciones, se recomienda:

- Realizar procesos de calibración de equipos de manera periódica para mantener la confiabilidad de las mediciones del equipo de pesaje.
- Utilizar otros métodos de ajustes en el futuro para tener un punto de comparación entre distintos métodos de ajuste y determinar si el utilizado es el más adecuado o existen otro con mejores resultados.
- Realizar un software computacional en línea utilizando el lenguaje de programación en php y javascript.

## 6. Bibliografía

- [1] Sistema Interamericano de Metrología. (2009). Guía para la Calibración de Instrumentos para pesar de Funcionamiento no Automático. [Online]. Disponible en: [https://www.cenam.mx/myd/pdf/normasguias/SIM%20MWG7\\_cg-01\\_v00%20Spanish%20Corrected\\_%209%20Feb.pdf](https://www.cenam.mx/myd/pdf/normasguias/SIM%20MWG7_cg-01_v00%20Spanish%20Corrected_%209%20Feb.pdf)
- [2] Guía SIM. Sistema Interamericano de Metrología: Guía para la calibración de los instrumentos para pesar de funcionamiento no automático. 2009
- [3] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). NTC ISO 2031: Instrumentos de pesaje de funcionamiento no automáticos. Requisitos metrológicos y técnicos. Pruebas. Bogotá D.C., 2014.
- [4] Vocabulario de Metrología Internacional (BIPM 2012) BIPM: Bureau International des Poids et Mesures ([www.bipm.org](http://www.bipm.org)).
- [5] Canalejo, P. Comparación de los resultados de calibración de una balanza aplicando la Guía ema-CENAM. México DF, 2010.
- [6] Natrella, M. Propuesta de Calibración de Instrumentos aplicando Técnica de Trazabilidad e incertidumbres en masa. 2008.
- [7] OIML, Draft International Recommendation - Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M2, M3, (including weights for testing of high capacity weighing machines) Part :1 Metrological and Technical Requirements. N° 111. 2000

- [8] Tapias, J. Evaluación de la confiabilidad metrológica de los instrumentos no automáticos de pesaje en los laboratorios de la universidad del atlántico. Barranquilla. 2017.
- [9] GUM, I. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, with Supplement 1, Evaluation of measurement data, JCGM 101. Organization for Standardization, Geneva, Switzerland. 2008
- [10] Cabarcas, M, & Mora, W. (2015). Diseño e Implementación de un Sistema de Aseguramiento Metrológico en la Empresa Inspectorate Colombia Ltda.
- [11] VIM. Vocabulario Internacional de Metrología: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM). Duque de Caxias, RJ, INMETRO, 2012. 94p.
- [12] Sistema Internacional de Unidades (SI), INMETRO 2007. 8ed (revisada), Rio de Janeiro/RJ – Brasil.
- [13] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). NTC ISO 9001: Sistemas de Gestión de la Calidad. Bogotá D.C., 2008.
- [14] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). NTC ISO 14001: Sistemas de Gestión Ambiental. Bogotá D.C., 2004.
- [15] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). NTC ISO 17025: Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. Bogotá D.C., 2005.
- [16] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). NTC ISO 10012: Sistemas de gestión de la medición. Requisitos para los procesos de medición y los equipos de medición. Bogotá D.C., 2003.
- [17] Torre, V. (s/f). Ajuste por Mínimos Cuadrados. Caracas: Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía.

- [18] Soler, V., Pérez, E., & Aznar, I. (2012). Calibración de Equipos en Base a Técnicas Estadísticas. Creación de Patrones. Revista de investigación Editada por Área de Innovación y Desarrollo, S.L.

## Anexo A: Código fuente de la sección balanza

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="es">
  <head>
    <meta charset="UTF-8">
    <meta http-equiv="X-UA-Compatible" content="IE=edge">
    <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1, shrink-to-fit=no">

    <title>App calibracion de balanzas</title>
    <link rel="stylesheet" href="../css/bootstrap.min.css">
    <link href="../css/estilos.css" rel="stylesheet">
  </head>
  <body>
    <nav class="navbar navbar-expand-md navbar-dark fixed-top bg-dark">
      <a class="navbar-brand" href="#"></a>
      <button class="navbar-toggler" type="button" data-toggle="collapse" data-
target="#navbarCollapse" aria-controls="navbarCollapse" aria-expanded="false" aria-
label="Toggle navigation">
        <span class="navbar-toggler-icon"></span>
      </button>
    </div>
    <div class="collapse navbar-collapse" id="navbarCollapse">
      <ul class="navbar-nav mr-auto">
        <li class="nav-item">
          <li class="nav-item active">
            <a class="nav-link" href="#">Home <span class="sr-only">(current)</span></a>
          </li>
          <li class="nav-item">
            <a class="nav-link" href="#">Link</a>
          </li>
        </ul>
        <ul class="nav navbar-nav navbar-right">
          <li><a href="#">Inicio de Sesión</a></li>
          <li><a href="#">Registro</a></li>
        </ul>
      </div>

    </div>

  </nav>
  <div class="container text-center">
    <div class="jumbotron">
      <h3 style="color: black;">CALIBRACION DE EQUIPOS DE PESAJE</h3>
    </div>
  </div>
  <div>
    <div class="container">
      <div class="row">
        <div class="col-md-4">
          <div class="input-group mb-3"><div class="input-group-prepend"><span class="input-
group-text" >No. Certificado</span></div>
```

```

    <input type="text" class="form-control" aria-label="ncertificado" aria-
describedby="ncertificado" id="ncertificado">
  </div>
  <div class="input-group mb-3">
    <div class="input-group-prepend">
      <span class="input-group-text" id="inputGroup">Solicitante</span>

    </div>
    <form method="get">
      <input input class="form-control" type="text" aria-label="solicitante" aria-
describedby="solicitante" list="browsers" name="browser" id="solicitante">
      <datalist id="browsers">
        <div id="algo">

        </div>
      </datalist>
    </form>
  </div>
  <div class="input-group mb-3">
    <div class="input-group-prepend">
      <span class="input-group-text" id="inputGroup">Dirección</span>
    </div>
    <input type="text" class="form-control" aria-label="direccion" aria-
describedby="direccion" id="direccion">
  </div>
  <div class="input-group mb-3">
    <div class="input-group-prepend">
      <span class="input-group-text" id="inputGroup-sizing-default">Lugar de
Calibración</span>
    </div>
    <input type="text" class="form-control" aria-label="lcalibracion" aria-
describedby="lcalibracion" id="lcalibracion">
  </div>
  <div class="input-group mb-3">
    <div class="input-group-prepend">
      <span class="input-group-text" id="inputGroup">Fecha de Recepción</span>
    </div>
    <input type="date" class="form-control" aria-label="frecepcion" aria-
describedby="frecepcion" id="frecepcion">
  </div>
  <div class="input-group mb-3">
    <div class="input-group-prepend">
      <span class="input-group-text" id="inputGroup">Fecha de Calibración</span>
    </div>
    <input type="date" class="form-control" aria-label="fcalibracion" aria-
describedby="fcalibracion" id="fcalibracion">
  </div>

</div>
<div class="col-md-4">
  <div class="input-group mb-3">
    <div class="input-group-prepend">
      <span class="input-group-text" id="inputGroup-sizing-default">Instrumento</span>
    </div>

```

```
        <input type="text" class="form-control" aria-label="instrumento" aria-
describedby="instrumento" id="instrumento">
    </div>
    <div class="input-group mb-3">
        <div class="input-group-prepend">
            <span class="input-group-text" id="inputGroup-sizing-default">Fabricante</span>
        </div>
        <input type="text" class="form-control" aria-label="fabricante" aria-
describedby="fabricante" id="fabricante">
    </div>
    <div class="input-group mb-3">
        <div class="input-group-prepend">
            <span class="input-group-text" id="inputGroup-sizing-default">Modelo</span>
        </div>
        <input type="text" class="form-control" aria-label="modelo" aria-describedby="modelo"
id="modelo">
    </div>
    <div class="input-group mb-3">
        <div class="input-group-prepend">
            <span class="input-group-text" id="inputGroup-sizing-default">Serie</span>
        </div>
        <input type="text" class="form-control" aria-label="serie" aria-describedby="serie"
id="serie">
    </div>
    <div class="input-group mb-3">
        <div class="input-group-prepend">
            <span class="input-group-text" id="inputGroup-sizing-default">Id-Codigó</span>
        </div>
        <input type="text" class="form-control" aria-label="codigo" aria-describedby="codigo"
id="codigo">
    </div>
    <div class="input-group mb-3">
        <div class="input-group-prepend">
            <span class="input-group-text" id="inputGroup-sizing-default"> División de
Escala</span>
        </div>
        <input type="number" class="form-control" aria-label="resolucion" aria-
describedby="resolucion" id="resolucion">
    </div>
    </div>
    <div class="col-md-4">
        <div class="input-group mb-3">
            <div class="input-group-prepend">
                <span class="input-group-text" id="inputGroup">División de Escala usada</span>
            </div>
            <input type="text" class="form-control" aria-label="rusada" aria-describedby="rusada"
id="rusada" placeholder="solo si es Análoga">
        </div>
        <div class="input-group mb-3">
            <div class="input-group-prepend">
                <span class="input-group-text" id="inputGroup">Carga Max</span>
            </div>
            <input type="number" class="form-control" aria-label="cmax" aria-describedby="cmax"
id="cmax">
        </div>
    </div>
```

```

<div class="input-group mb-3">
  <div class="input-group-prepend">
    <label class="input-group-text" for="inputGroupSelect">Unidad</label>
  </div>
  <select class="custom-select" id="unidad">
    <option value="g">g</option>
    <option value="kg">kg</option>
  </select>
</div>

<div class="input-group mb-3">
  <div class="input-group-prepend">
    <span class="input-group-text" id="inputGroup-sizing-default">Tolerancia del
Cliente</span>
  </div>
  <input type="text" class="form-control" aria-label="tcliente" aria-describedby="tcliente"
id="tcliente">
  </div>
  <div class="input-group mb-3">
    <div class="input-group-prepend">
      <label class="input-group-text" for="inputGroupSelect">Masas a utilizar</label>
    </div>
    <select class="custom-select" id="clase">
      <option value="E2">E2</option>
      <option value="F1">F1</option>
      <option value="F2">F2</option>
      <option value="M1">M1</option>
      <option value="M2">M2</option>
    </select>

  </div>

  <button onclick="parteA()" type="button" class="btn btn-success"><a
href="calbal1.html" >Siguiete:</a></button>
  </div>
</div>

<div id="algo1">
</div>
<script src=" ../js/jquery-3.3.1.slim.min.js"></script>
<script src=" ../js/popper.min.js"></script>
<script src=" ../js/bootstrap.min.js"></script>
<script src=" ../js/balanza.js"></script>

</html>

```