



REGIONAL FUND QUALITY INFRASTRUCTURE FOR BIODIVERSITY & CLIMATE PROTECTION
IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN

Workshop on Statistic, data analysis and measurement uncertainty for Meteorology

Fundamentos estadísticos para la evaluación de la incertidumbre en las calibraciones

CENAM – Querétaro, México – 02 ~ 06.12.2019

Márcio A. A. Santana – INPE/BR
marcio.santana@inpe.br

Ricardo de A. Kalid – UFSB/BR
kalid@ufsb.edu.br



Comparación entre dos muestras

Muestra patrón: Elementos de muestra obtenidos con instrumento calibrado y trazabilidad a SI

Muestra objeto: Elementos de muestra obtenidos con instrumento no calibrado, pero mejor si calibrado y con trazabilidad a SI

Verificación con trazabilidad



Requisitos y recomendaciones para la calibración de sensores meteorológicos
– EMA (Viento). Buenos Aires – AR, noviembre de 2018.. doi 10.5281

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 *difference (D)*—the difference between the systematic difference (d) of a set of samples and the true mean (μ) of the

Sin sesgo y sin dimensiones: $M = \frac{n}{(n-1) \cdot (n-2)} \cdot \frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^3}{s^3}$

3.2.2 *systematic difference (d)*—the mean of the differences in the measurement by the two systems:

$$d = \frac{1}{N} \sum (X_{ai} - X_{bi}) \quad (2)$$

Sin sesgo y sin dimensiones:

$$K = \frac{n \cdot (n+1)}{(n-1) \cdot (n-2) \cdot (n-3)} \cdot \frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^4}{s^4} - 3 \frac{(n-1)^2}{(n-2) \cdot (n-3)}$$

$$C = \pm \sqrt{\frac{1}{N} \sum (X_{ai} - X_{bi})^2} \quad (3)$$

Estas expresiones son análogas a las desviaciones estándar, por lo que, por analogía, solo deben considerarse la raíz positiva.

measure of the dispersion of a series of differences around their mean.

$$s = \pm \sqrt{C^2 - d^2} \quad (4)$$

3.2.5 *skewness (M)*—the symmetry of the distribution (the third moment about the mean).

$$M = \frac{\sum_{i=1}^N ((X_{ai} - X_{bi}) - d)^3}{N^3}$$

$M = 0$ for normal distribution.

3.2.6 *kurtosis (K)*—the peakedness of the fourth moment about the mean), $K = 3$ for normal distribution.

$$K = \frac{\sum_{i=1}^N ((X_{ai} - X_{bi}) - d)^4}{N^4}$$

N hace que M y K sean muy pequeños y con dimensiones

3.2.7 *response time (T)*—the time required for the change in output of a measuring system to reach 63 % of a step function change in the variable being measured.

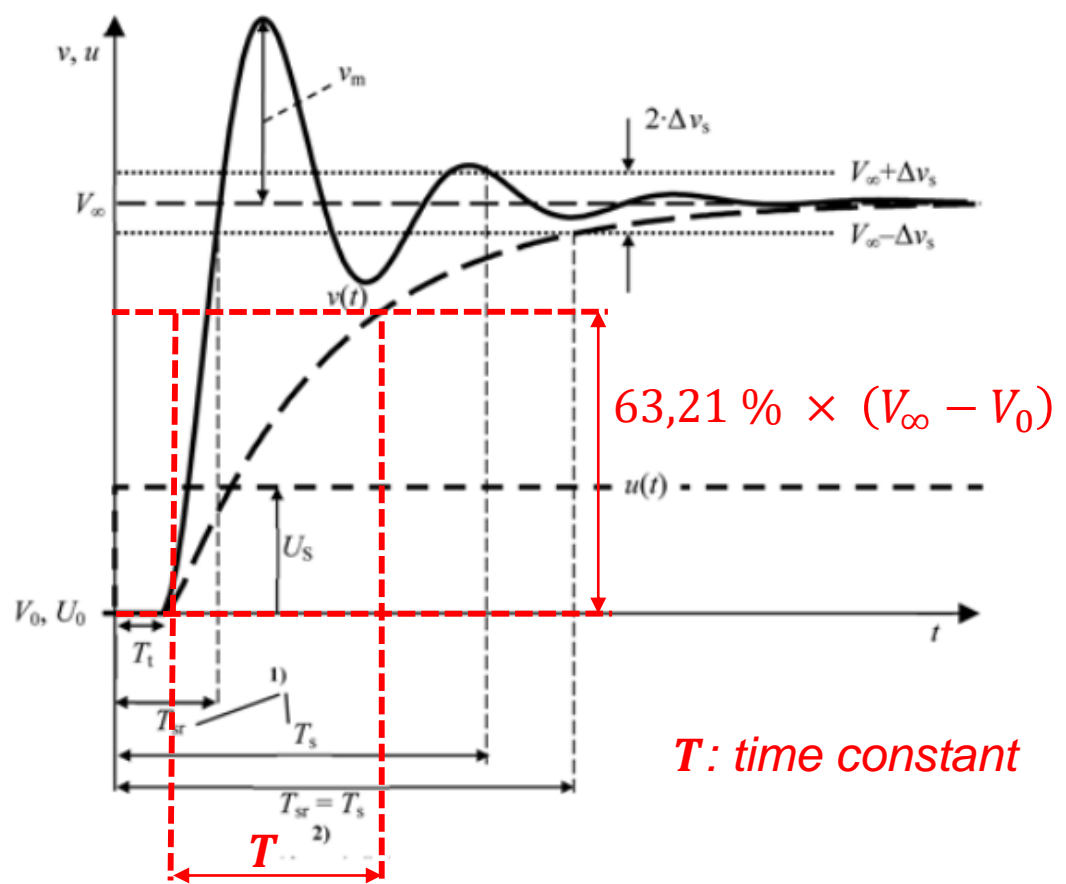
La definición 3.2.7 no está de acuerdo con la norma IEC 60050, recomendado por VIM. De acuerdo la norma IEC 60050 T es la constante de tiempo (*time constante*) y tiempo de respuesta (*response time*) es $4T = T_{sr}$.

IEC 60050 tiempo de respuesta (response time)

<http://www.electropedia.org/iev/insf/display?openform&ievref=345-37>

time constant (T)
time required for the amplitude of that component of a field quantity which decays exponentially with time to change by the factor $1/e = 0,3679...$

<http://www.electropedia.org/iev/insf/display?openform&ievref=8021-45>



1) Pour comportement périodique / for periodic behaviour
2) Pour comportement aperiodique / for aperiodic behaviour

| | | |
|----------------------|--|---|
| u | Variable d'entrée | Input variable |
| U_0 | Valeur initiale de la variable d'entrée | Initial value of the input variable |
| U_S | Hauteur de l'échelon de la variable d'entrée | Step height of the input variable |
| v | Variable de sortie | Output variable |
| V_0, V_{∞} | Valeurs en régime établi, avant et après application de l'échelon | Steady-state values before and after application of the step |
| v_m | Taux de dépassement (déviations transitoire maximale à partir de la valeur en régime établi final) | Overshoot (maximum transient deviation from the final steady-state value) |
| $2 \cdot \Delta v_s$ | Limite de tolérance spécifiée | Specified tolerance limit |
| T_{sr} | Temps de réponse à un échelon | Step response time |
| T_s | Durée d'établissement | Settling time |

Pruebas de hipótesis para **curtosis** ($M = 0$) y **coeficiente de asimetría** ($K = 0$)

| Parámetro | Aproximación desviación estándar (<i>standard error</i>) | Límite inferior del intervalo de confianza | Límite inferior del intervalo de confianza |
|---------------------|---|--|--|
| Assimetria (M): | $se_M = \sqrt{6 \frac{n \cdot (n-1)}{(n-2) \cdot (n+1) \cdot (n+3)}}$ | $M - t \cdot se_M$ | $M + t \cdot se_M$ |
| Curtosis (K): | $se_K = \sqrt{4 \frac{(n^2 - 1) \cdot se_M^2}{(n-3) \cdot (n+5)}}$ | $K - t \cdot se_K$ | $K + t \cdot se_K$ |

Para $n \rightarrow \infty : se_M \rightarrow \sqrt{6/n}$ y $se_K \rightarrow \sqrt{24/n}$

Quantile: $t = INV.NORM.ESTAND \left(1 - \frac{NS/2}{100} \right)$

Nivel de Significancia ($NS = 100 \% - NC$)

Nivel de confianza (NC)

George, D., & Mallery, M. (2010). SPSS for Windows Step by Step: A Simple Guide and Reference, 17.0 update (10a ed.) Boston: Pearson.

¡Vamos a practicar!

Estadísticos de la ASTM D4430-00

Comparaciones entre medidas de campo (mismo mensurando)

Procedimiento:

- 1) Obtenga las Indicaciones y Correcciones del Objeto (I_o, C_o) y de la Referencia (I_r, C_r)
- 2) Obtenga los Resultados de Medida ($RM = I + C$)
- 3) Calcule la diferencia entre el objeto y la referencia
 $d = RMo - RMr$
- 4) Identificar región en régimen estacionario para d
- 5) Eliminar datos divergentes en RM_o , RM_r y d

Duas abordagens:

- 1) A partir da técnica *bootstrap*, calcular as estatísticas e fazer as comparações entre as grandezas
- 2) Considerar que as grandezas seguem distribuição Student e utilizar a incerteza expandida para fazer as comparações

Em ambas as alternativas compararar

- i. O intervalo de abrangência a partir da Moda (valor mais provável), esse teste é mais rigoroso e serve para distribuições simétricas e assimétricas
- ii. Desvio-padrão
- iii. Desvio-padrão relativo
- iv. Intervalo de abrangência
- v. Desvio máximo admissível

Estadísticas de la ASTM 4430-00

Standard Practice for Determining the Operational Comparability of Meteorological Measurements

Tabla T-05: Estadísticas segundo norma ASTM 4430-00.

| Item | Símbolo | Estadística | Valor | Unidad | Observaciones |
|-------|---------|--|---------|----------------------------------|-------------------------|
| 12.1 | C | Comparabilidad operacional (3.2.3 <i>operational comparability</i>) | 0,1114 | K | |
| 12.2 | d | Diferencia sistemática (3.2.1 <i>systematic difference</i>) | -0,10 | K | |
| 12.3 | N | Cantidad de elementos muestrais (<i>number of samples used to calculate C and d</i>) | 29 | | |
| 12.4 | t | Intervalo de tiempo entre pares de elementos de muestra (<i>time interval between pairs of samples</i>) | | | ingresar información |
| 12.5 | A | Rango de medidas (<i>range of measurements</i>) | 0,2 | K | |
| 12.6 | ? | Dependence between the sample difference... (<i>measured and the magnitude of the measurement</i>) | ? | ? | |
| 12.7 | | Evidencia de interacción del sistema que afectaría la diferencia sistemática d | | | ingresar información |
| 12.8 | M | Asimetría (3.2.5 <i>skewness</i>) | 0,0000 | (K) ³ | $M = 0$ para FDP normal |
| 12.9 | K | Curtosis (3.2.6 <i>kurtosis</i>) | 0,0000 | ((K) ²) ² | $K = 3$ para FDP normal |
| 12.10 | | Fecha y hora de la calibración más reciente | | | ingresar información |
| 12.11 | r | Resolución (3.2.9 <i>resolution</i>) | 0,10 | K | ingresar información |
| 12.12 | | Fecha y hora de inicio del período de recopilación de datos | | | ingresar información |
| 12.13 | | Fecha y hora de finalización del período de recopilación de datos | | | ingresar información |
| | D | Diferencia (3.2.1 <i>difference</i>) | -296,14 | K | |
| | μ | Media de la población (<i>mean of the population</i>) | 296,04 | K | Media del patrón |
| | s | Desviación estándar estimada de la diferencia (3.2.4 <i>estimated standard deviation of the difference</i>) | 0,0556 | K | |
| | T | Tiempo de respuesta (3.2.7 <i>response time</i>) | | | ingresar información |
| | Nn | Cantidad mínima muestras (9.6.1) | 3 | | |
| | Ni | Cantidad mínima de elementos en cada muestra (11.5) | 3 | | |

Procedimientos:

Análisis de indicaciones

Evaluación de la incertidumbre

Calibración punto a punto

Calibración unidireccional

Calibración bidireccional

Procedimientos

- 1) **(A)** Análisis de indicaciones
- 2) **(B)** Evaluación de incertidumbre de medición
- 3) **(C)** Comparación de medidas meteorológicas
- 4) **(D)** Calibración punto a punto
- 5) **(E)** Curva de calibración unidireccional
- 6) **(F)** Curva de calibración bidireccional

Combinaciones:

- 7) **(A) → (B) → (C)** (los instrumentos ya están calibrados)
- 8) **(A) → (D) → (B) → (C)**
- 9) **(A) → (E) → (B) → (C)**
- 10) **(A) → (E) → (F)**

(A) Análisis de indicaciones

- A.1)** Establecer el propósito del trabajo
- A.2)** Conocer el mensurando
- A.3)** Conocer el sistema de medida
- A.4)** Identificar las indicaciones, hacer las correcciones, su unidad, el sistema de medición, la fecha, el horario y el lugar de los experimentos, el experimentador, el técnico responsable, el certificado de calibración del instrumento, los registradores de datos, el software aprobado que se utilizará; otra información según sea necesario; fecha, hora, ubicación de los cálculos estadísticos
- A.5)** Elaborar, analizar, interpretar, comentar tablas y gráficos:
 - i. Correlograma
 - ii. Box plot
 - iii. Histograma
 - iv. Diagrama de tendencias
 - v. Diagrama de dispersión
- A.6)** Evaluar y seleccionar indicaciones en régimen estacionario (auto correlación),
- A.7)** Eliminar los puntos experimentales divergentes;
- A.8)** Preparar informe.

(B) Evaluación de incertidumbre de medición

- B.1) Establecer los objetivos del trabajo
- B.2) Ejecutar la **(A) Análisis de indicaciones**
- B.3) Enumerar las fuentes de incertidumbre (diagrama de Ishikawa), magnitudes de entrada e de salida
- B.4) Cuantificar las fuentes de incertidumbre e sus grados de libertad
- B.5) Establecer la función de medición
- B.6) **Propagar la incertidumbre estándar** de las magnitudes de entrada a la magnitud de salida
- B.6) Identificar las fuentes más importantes de incertidumbre estándar (coeficientes de Kessel)
- B.7) Decidir si la medición y sus incertidumbres estándar son apropiadas
- B.8) Calcular grados efectivos de libertad, factor de cobertura e incertidumbre expandida o intervalo de cobertura,
- B.9) Verificar si el resultado de la medición (RM) y su incertidumbre expandida cumplan con el criterios de aceptaciones, p. e.:
 $EMP < \text{especificación}$. (EMP: Error Máximo Permitido = $U + \text{tol.}$);
- B.10) Preparar informe.

Procedimiento sugerido para evaluación de incertidumbre sin correlación :

- 1) Establecer los objetivos de la evaluación de la incertidumbre
- 2) Conocer el mensurando
- 3) Conocer el sistema de medida
- 4) Identificar las indicaciones, su unidad, el sistema de medición, la fecha, el horario y el lugar de los experimentos, el experimentador, el técnico responsable, el certificado de calibración del instrumento, los registradores de datos, el software aprobado que se utilizará; otra información según sea necesario; fecha, hora, ubicación de los cálculos de incertidumbre
- 5) Evaluar (use autocorrelación) y seleccionar indicaciones en régimen estacionario
- 6) Eliminar los puntos experimentales divergentes
- 7) Enumerar las fuentes de incertidumbre (diagrama de Ishikawa)
- 8) Cuantificar las fuentes de incertidumbre e sus grados de libertad
- 9) Establecer la función de medición
- 10) Propagar la incertidumbre estándar de las magnitudes de entrada a la magnitud de salida
- 11) Identificar las fuentes más importantes de incertidumbre
- 12) Decidir si la medición y sus incertidumbres son apropiadas
- 13) Calcular grados efectivos de libertad, factor de cobertura e incertidumbre expandida;
- 14) Informar y verificar que el resultado de la medición (RM) y su incertidumbre cumplan con las especificaciones.

(C) Comparación de medidas meteorológicas

- C.1)** Establecer los objetivos del trabajo
- C.2)** Ejecutar la **(A) Análisis de indicaciones**
- C.3)** Evaluar las estadísticas, p. e.: diferencia sistemática (*d*), comparabilidad operacional (*C*), asimetría (*M*), curtosis (*K*), tiempo de reposta (*T*) etc.)
- C.4)** Verificar si la diferencia sistemática es adherente a FDP normal, si no es normal evaluar las causas
- C.5)** Ejecutar la **(B) Evaluación de incertidumbre de medición para**
 - (i)** el instrumento de referencia
 - (ii)** el instrumento objeto
- C.7)** Decidir si la medición y sus incertidumbres estándar son apropiadas
- C.8)** Calcular grados efectivos de libertad, factor de cobertura e incertidumbre expandida o intervalo de cobertura,
- C.9)** Informar y verificar que el resultado de la medición (RM) y su incertidumbre cumplan con el criterios de aceptaciones, p. e.: $EMP < \text{especificación}$;
- C.10)** Preparar informe.

(D) Calibración punto a punto

- D.1)** Establecer los objetivos del trabajo
- D.2)** Ejecutar la **(A) Análisis de indicaciones,**
- D.3)** Seleccionar la(s) norma(s) pertinente(s);
si no existir una norma apropiada, establecer un protocolo
- D.4)** Verificar si las condiciones experimentales cumplen con las condiciones mínimas establecidas en la(s) norma(s) seleccionada(s) o protocolo establecido,
- D.5)** Ejecutar la **(B) Evaluación de incertidumbre de medición;**
- D.6)** Elaborar el certificado de calibración.

(E) Calibración unidireccional

- E.1)** Establecer los objetivos del trabajo
- E.2)** Ejecutar la **(A) Análisis de indicaciones,**
- E.3)** Seleccionar la(s) norma(s) pertinente(s);
si no existir una norma apropiada, establecer un protocolo
- E.4)** Verificar si las condiciones experimentales cumplen con las condiciones mínimas establecidas en la(s) norma(s) seleccionada(s) o protocolo establecido.
- E.5)** Calcular la **curva de calibración** unidireccional
- E.6)** Evaluar si la curva de calibración unidireccional es apropiada
- E.7)** Elaborar, analizar, interpretar y comentar la región de cobertura de los parámetros: **Evaluación de incertidumbre de los parámetros;**
- E.8)** Ejecutar la **(B) Evaluación de incertidumbre de medición y de predicción;**
- E.9)** Invertir la curva de calibración, obtener la función de medición
- E.10)** Elaborar el certificado de calibración.

Curva de calibración

Procedimiento sugerido para obtener curva de calibración:

- 1) Establecer los objetivos de la evaluación de la calibración
- 2) Conocer el mensurando
- 3) Conocer el sistema de medida
- 4) Identificar las indicaciones, hacer las correcciones, su unidad, el sistema de medición, la fecha, el horario y el lugar de los experimentos, el experimentador, el técnico responsable, el certificado de calibración del instrumento, los registradores de datos, el software aprobado que se utilizará; otra información según sea necesario; fecha, hora, ubicación de los cálculos de incertidumbre
- 5) Evaluar (use autocorrelación) y seleccionar indicaciones en régimen estacionario
- 6) Eliminar los puntos experimentales divergentes
- 7) Enumerar las fuentes de incertidumbre (diagrama de Ishikawa)
- 8) Cuantificar las fuentes de incertidumbre e sus grados de libertad
- 9) Establecer la función de calibración e la función de medición
- 10) Evaluar la incertidumbre estándar de las magnitudes de entrada a la magnitud de salida
- 11) Identificar las fuentes más importantes de incertidumbre
- 12) Decidir si la medición y sus incertidumbres son apropiadas,
- 13) Calcular grados efectivos de libertad, factor de cobertura e incertidumbre expandida;
- 14) Informar y verificar que el resultado de la medición (RM) y su incertidumbre cumplan con el criterios de aceptaciones, p. e.: $EMP < \text{especificación}$.

(F) Calibración bidireccional

- F.1) Establecer los objetivos del trabajo
- F.2) Ejecutar la **(A) Análisis de indicaciones**,
- F.3) Seleccionar la(s) norma(s) pertinente(s);
si no existir una norma apropiada, establecer un protocolo
- F.4) Verificar si las condiciones experimentales cumplen con las condiciones mínimas establecidas en la(s) norma(s) seleccionada(s) o protocolo establecido
- F.5) Calcular la **curva de calibración bidireccional**:
 - (i) **Unidireccional en los dos sentidos**
 - (ii) **Propagación de la incertidumbre estándar de la referencia para el objeto**
 - (iii) **Simultanea estimación de parámetros y reconciliación de datos**
- F.6) Evaluar si la curva de calibración bidireccional es apropiada
- F.7) Elaborar, analizar, interpretar y comentar la región de cobertura de los parámetros: **Evaluación de incertidumbre de los parámetros**;
- F.8) Ejecutar la **(B) Evaluación de incertidumbre de medición y de predicción**;
- F.9) Elaborar el certificado de calibración.

Sugerencias para presentación de certificados de calibración

Certificados de calibración deben siempre presentar: Informaciones conforme normas SI, VIM, GUM, ISO 17 025

Por ejemplo:

- 1) No usar \pm a o informar la incertidumbre
- 2) Usar o apellido en las incertidumbres:
 - a) Incertidumbre estándar; o
 - b) incertidumbre típica Tipo A o Tipo B;
 - c) Incertidumbre estándar combinada; o
 - d) Incertidumbre expandida; neste caso informar también (i) **fator de cobertura**, (ii) **FDP utilizada**, (iii) **grados efectivos de libertad**, (iv) **probabilidad de cobertura**
- 3) Usar las barras (/) em tablas y ejos de los gráficos antes de unidades
- 4) Usar la palabra “sesgo” en lugar de “error”
- 5) Informar los datos da calibración
- 6) Informar los meta-datos da calibración
- 7) Sumario de incertidumbres (*uncertainties budget*) y métodos utilizados (LPI, Monte Carlo, calibración unidireccional o bidireccional etc.)
- 8) Si utilizo datos centrados o no centrados em la media
- 9) Matriz de varianza-covarianza del parámetros
- 10) Curva de calibración y su inversa (función de medición)



REGIONAL FUND QUALITY INFRASTRUCTURE FOR BIODIVERSITY & CLIMATE PROTECTION
IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN

Workshop on Statistics, data analysis and measurement uncertainty in Meteorology

Fundamentos estadísticos para la evaluación de la incertidumbre en las calibraciones



Márcio A. A. Santana – INPE/BR
marcio.santana@inpe.br

Ricardo de A. Kalid – UFSB/BR
kalid@ufsb.edu.br



TECLIM-UFSB