

INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA EXPERIMENTAL

MEDICIÓN DE UNA MAGNITUD FÍSICA

INCERTIDUMBRES

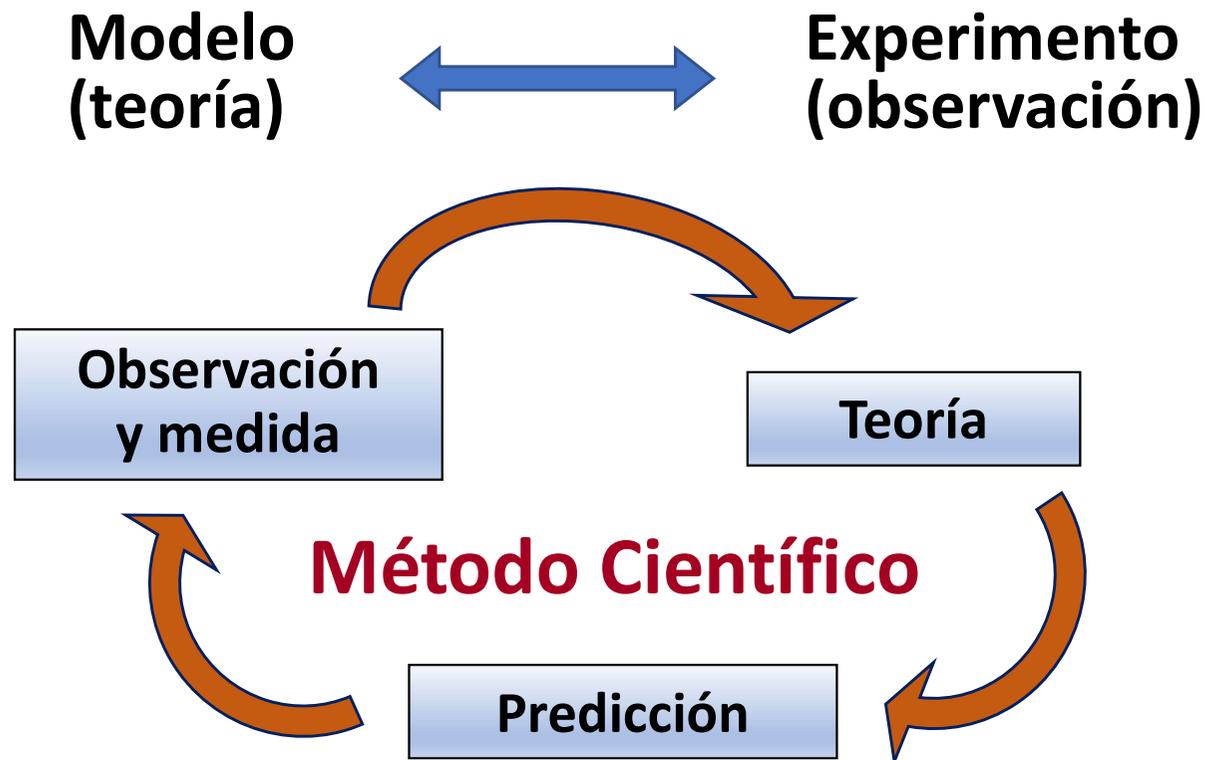
Laboratorio 1 – 2do Cuatrimestre de 2025

Departamento de Física
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad de Buenos Aires

El gusto/necesidad de medir

La física se ocupa de describir y entender la naturaleza

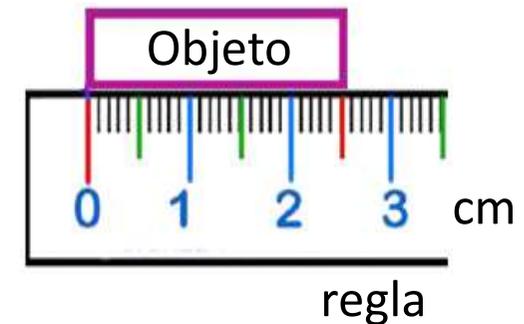
La medición es una de sus herramientas fundamentales para hacerlo de forma objetiva



Magnitud Física (MF):

Atributo de un cuerpo, fenómeno o sustancia que puede ser cuantificada (ej. masa, longitud, velocidad, carga eléctrica)

Medir es comparar la cantidad de la MF que se desea obtener con una unidad de la misma magnitud (Patrón)



Para llevar a cabo una medición:

- Objeto - Fenómeno
- Observador
- Instrumento
- Método

Definir
Sistema de
Unidades
SI



El Sistema Internacional de Unidades

En noviembre de 2018 se aprobó la mayor revisión del **Sistema Internacional de Unidades (SI)** desde su creación (1960). El principal cambio es que a partir de ahora todas las unidades se definen en base a constantes de referencia, como la velocidad de la luz para el metro y la constante de Planck para el kilogramo. La revisión entrará en vigencia el 20 de mayo de 2019.

● La candela

La **candela**, cuyo símbolo es **cd**, es la unidad de intensidad luminosa del SI en una dirección dada. Se la define estableciendo el valor numérico fijo de la eficacia luminosa de una radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hz, K_{cd} , igual a 683 cuando es expresada en las unidades $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$, que son equivalentes a $\text{cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{W}^{-1}$, o $\text{cd}\cdot\text{s}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, donde el kilogramo, el metro y el segundo son definidos en términos de h , c y $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Magnitud de base: intensidad luminosa (I_v)

ALGUNAS UNIDADES DERIVADAS DE LA CANDELA		
Magnitud	Unidad	Expresión en unidades de base
Flujo luminoso	lumen (lm)	$\text{cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{m}^2$
Iluminancia	lux (lx)	$\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}$

● El mol

El **mol**, cuyo símbolo es **mol**, es la unidad de cantidad de sustancia (o materia) del SI. Un mol contiene exactamente $6,022\,140,76 \times 10^{23}$ entidades elementales. Este número es el valor numérico fijo de la constante de Avogadro, N_A , cuando es expresada en unidades de mol^{-1} y es llamado el número de Avogadro.

La cantidad de sustancia, símbolo n , de un sistema es una medida del número de entidades elementales especificadas. Una entidad elemental puede ser un átomo, una molécula, un ion, un electrón, o cualquier otra partícula o grupo específico de partículas.

Magnitud de base: cantidad de sustancia (n)

ALGUNAS UNIDADES DERIVADAS DEL MOL		
Magnitud	Unidad	Expresión en unidades de base
Concentración	mol por metro cúbico	$\text{m}^{-3}\cdot\text{mol}$
Actividad catalítica	katal (kat)	$\text{s}^{-1}\cdot\text{mol}$

● El kelvin

El **kelvin**, cuyo símbolo es **K**, es la unidad de temperatura termodinámica del SI. Se lo define estableciendo el valor numérico fijo de la constante de Boltzmann, k , igual a $1,380\,650 \times 10^{-23}$ cuando es expresada en unidades de $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$, que es igual a $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, donde el kilogramo, el metro y el segundo son definidos en términos de h , c y $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Magnitud de base: temperatura termodinámica (T)

ALGUNAS UNIDADES DERIVADAS DEL KELVIN		
Magnitud	Unidad	Expresión en unidades de base
Temperatura Celsius	grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$)	$T/\text{K} - 273,15$
Conductividad térmica	watt por metro kelvin	$\text{m}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$
Resistencia térmica superficial	metro cuadrado kelvin por watt	$\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^2\cdot\text{K}$
Capacidad térmica	joule por kelvin	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$



● El kilogramo

El **kilogramo**, cuyo símbolo es **kg**, es la unidad de masa del SI. Se lo define estableciendo el valor numérico fijo de la constante de Planck, h , igual a $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ cuando es expresada en unidades de $\text{J}\cdot\text{s}$, que es igual a $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$, donde el metro y el segundo son definidos en términos de c y $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Magnitud de base: masa (m)

ALGUNAS UNIDADES DERIVADAS DEL KILOGRAMO		
Magnitud	Unidad	Expresión en unidades de base
Fuerza	newton (N)	$\text{m}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$
Presión	pascal (Pa)	$\text{m}^{-2}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$
Energía	joule (J)	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$
Potencia	watt (W)	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}$

● El metro

El **metro**, cuyo símbolo es **m**, es la unidad de longitud del SI. Se lo define estableciendo el valor numérico fijo de la velocidad de la luz en el vacío, c , igual a $299\,792\,458$ cuando es expresada en unidades de $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, donde el segundo es definido en términos de la frecuencia del cesio $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Magnitud de base: longitud (l , x , r , etc.)

ALGUNAS UNIDADES DERIVADAS DEL METRO		
Magnitud	Unidad	Expresión en unidades de base
Área, superficie	metro cuadrado	m^2
Volumen	metro cúbico	m^3
Ángulo plano	radián (rad)	$\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$
Ángulo sólido	esteradian (sr)	$\text{m}^2\cdot\text{m}^{-2}$

● El segundo

El **segundo**, cuyo símbolo es **s**, es la unidad de tiempo del SI. Se lo define estableciendo el valor numérico fijo de la frecuencia de cesio, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, la frecuencia de la transición entre niveles hiperfinos del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio 133, igual a $9\,192\,631\,770$ cuando es expresada en unidades de Hz, que es igual a s^{-1} .

Magnitud de base: tiempo (t)

ALGUNAS UNIDADES DERIVADAS DEL SEGUNDO		
Magnitud	Unidad	Expresión en unidades de base
Frecuencia	hertz (Hz)	s^{-1}
Actividad de un radionucleido	becquerel (Bq)	s^{-1}
Dosis equivalente	sievert (Sv)	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$

● El ampere

El **ampere**, cuyo símbolo es **A**, es la unidad de corriente eléctrica del SI. Se lo define estableciendo el valor numérico fijo de la carga elemental, e , igual a $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ cuando es expresada en unidades de $\text{A}\cdot\text{s}$, donde el segundo es definido en términos de $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Magnitud de base: intensidad de corriente eléctrica (i , I)

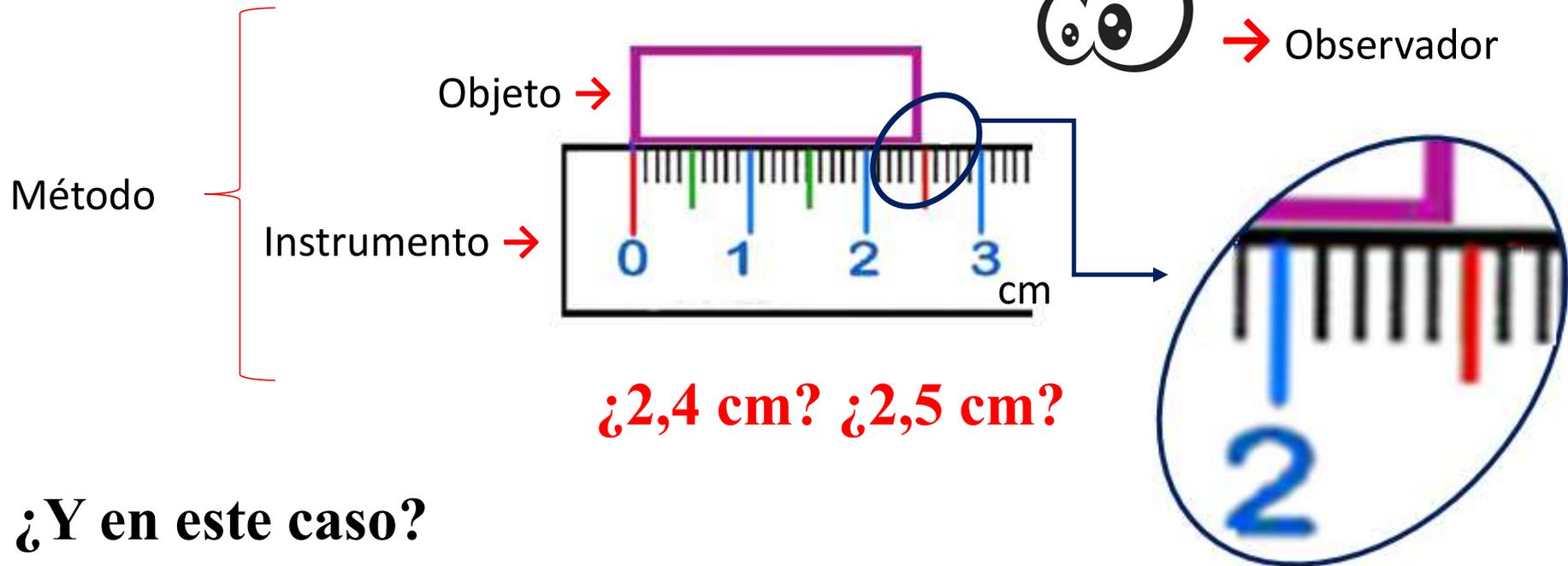
ALGUNAS UNIDADES DERIVADAS DEL AMPERE		
Magnitud	Unidad	Expresión en unidades de base
Carga eléctrica	coulomb (C)	$\text{A}\cdot\text{s}$
Tensión eléctrica	volt (V)	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{A}^{-1}$
Resistencia, impedancia	ohm (Ω)	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{A}^{-2}$
Capacidad eléctrica	farad (F)	$\text{m}^{-2}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^4\cdot\text{A}^2$
Inductancia	henry (H)	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{A}^{-2}$
Densidad de flujo magnético	tesla (T)	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{A}^{-1}$

PREFIJOS DEL SI

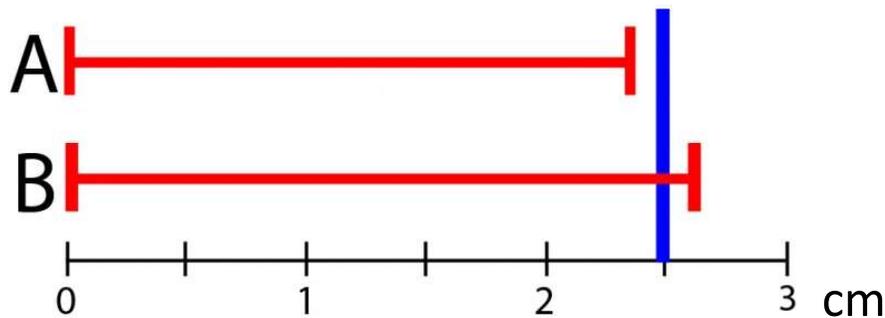
Prefijo	Símbolo	Factor	Equivalencia decimal
yotta	Y	10^{24}	1 000 000 000 000 000 000 000 000
zetta	Z	10^{21}	1 000 000 000 000 000 000 000
exa	E	10^{18}	1 000 000 000 000 000 000
peta	P	10^{15}	1 000 000 000 000 000
tera	T	10^{12}	1 000 000 000 000
giga	G	10^9	1 000 000 000
mega	M	10^6	1 000 000
kilo	k	10^3	1 000
hecto	h	10^2	100
deca	da	10^1	10
sin prefijo		1	1
deci	d	10^{-1}	0.1
centi	c	10^{-2}	0.01
mili	m	10^{-3}	0.001
micro	μ	10^{-6}	0.000 001
nano	n	10^{-9}	0.000 000 001
pico	p	10^{-12}	0.000 000 000 001
femto	f	10^{-15}	0.000 000 000 000 001
atto	a	10^{-18}	0.000 000 000 000 000 001
zepto	z	10^{-21}	0.000 000 000 000 000 000 001
yocto	y	10^{-24}	0.000 000 000 000 000 000 000 001

- Objeto
- Observador
- Instrumento
- Método

¿Cuánto mide el largo del objeto?



¿Y en este caso?



El resultado de una medición depende de múltiples causas

Incerteza

$$2,4 \text{ cm} \leq L \leq 2,5 \text{ cm}$$



VA con fluctuaciones

¿Cuál es el período del metrónomo?



1,25 s

1,23 s

1,23 s

1,22 s

1,25 s

1,26 s

1,24 s

1,26 s

1,23 s

El resultado de una medición está acotado

¿Que esperarías obtener si sigo midiendo?

1,25 s

0,88 s

2,40 s

1,24 s

¿Cuál es el período del metrónomo?



1,25 s

1,23 s

1,23 s

1,22 s

1,25 s

1,26 s

1,24 s

1,26 s

1,23 s

El resultado de la medición está acotado por múltiples factores aleatorios

...una medición está acotado

¿Que esperaría obtener si sigo midiendo?

1,25 s

0,88 s

2,40 s

1,24 s

Fuentes de incerteza

Incertezas vinculadas con la precisión del instrumento (método)

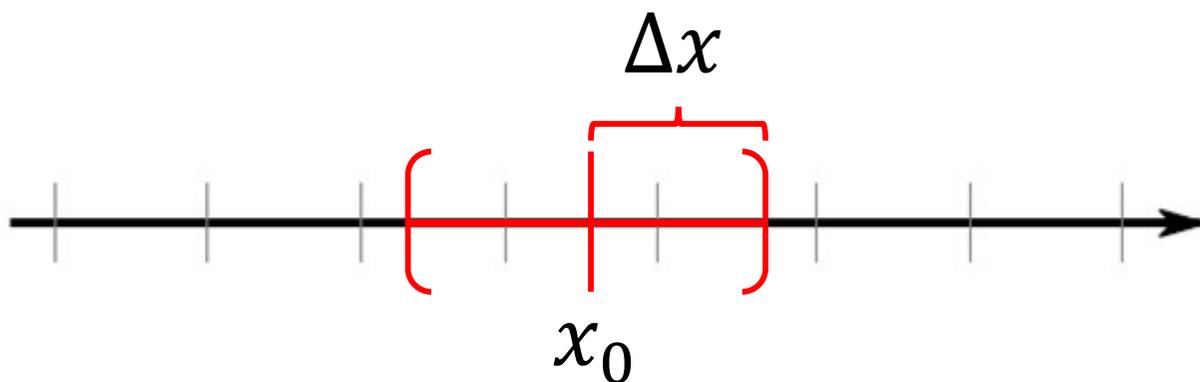
→ Apreciación

Incertezas vinculadas con fluctuaciones “aleatorias”

→ Estadística

AMBAS CONTRIBUYEN A LA INCERTEZA ABSOLUTA

¿Cómo expresamos el resultado de una medición?



RESULTADO

$$x = x_0 \pm \Delta x$$

Intervalo de Confianza

$$x_0 - \Delta x \leq x \leq x_0 + \Delta x$$

$$[x_0 - \Delta x, x_0 + \Delta x]$$

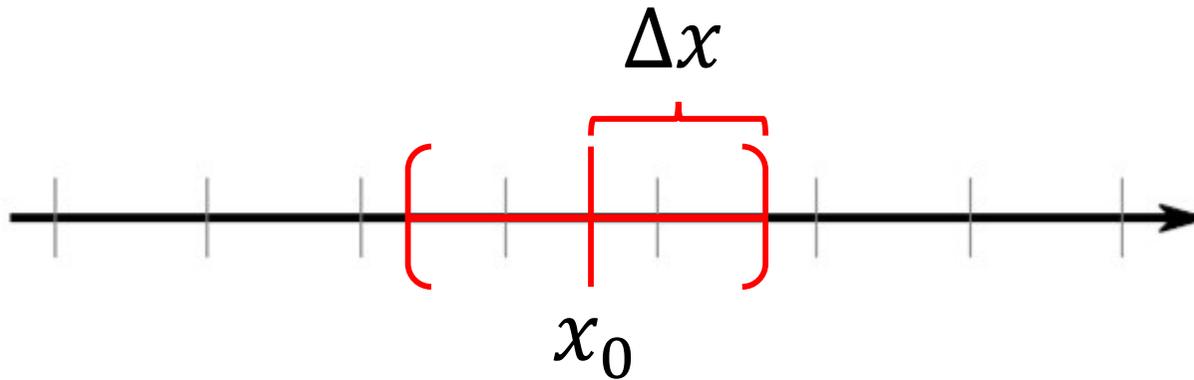
$x_0 \rightarrow$ Valor más representativo (\bar{x})

$\Delta x \rightarrow$ Incerteza Absoluta
Error Absoluto

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta x}{x_0} \rightarrow \text{Error Relativo}$$

$$\varepsilon_{r\%} = \varepsilon_r \times 100\% \rightarrow \text{Error Relativo porcentual}$$

¿Cómo expresamos el resultado de una medición?



¿ Δx ?

RESULTADO

$$x = x_0 \pm \Delta x$$

Intervalo de Confianza

$$x_0 - \Delta x \leq x \leq x_0 + \Delta x$$

$$[x_0 - \Delta x, x_0 + \Delta x]$$

$x_0 \rightarrow$ Valor más representativo (\bar{x})

$\Delta x \rightarrow$ Incerteza Absoluta
Error Absoluto

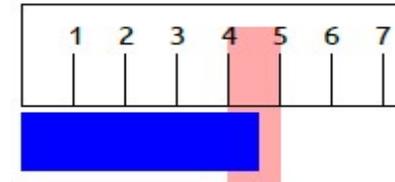
$$\varepsilon_r = \frac{\Delta x}{x_0} \rightarrow \text{Error Relativo}$$

$$\varepsilon_{r\%} = \varepsilon_r \times 100\% \rightarrow \text{Error Relativo porcentual}$$

MEDICIONES DIRECTAS

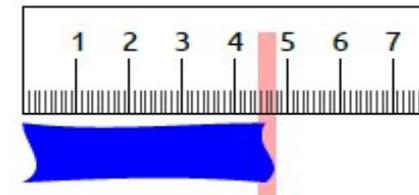
Errores *introducidos por el INSTRUMENTO*

I. Mínima división que permite resolver el instrumento



II. Mínima división que puedo resolver considerando el objeto

Asociado con la falta de definición del objeto



**Ambos
contribuyen**

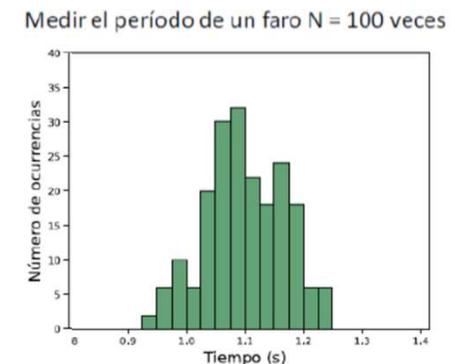
$$\Delta x_{Ap}$$

MEDICIONES DIRECTAS

Errores producidos al AZAR - ¿Qué hacemos si la medición no es repetible?

I. Intrínsecos:
Naturaleza del fenómeno

II. Método de medición
Asociado con el observador



En esos casos...

Δx_e

Valor más representativo (\bar{x} o x_0)

Si mido N veces



$x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$



Es el valor
promedio



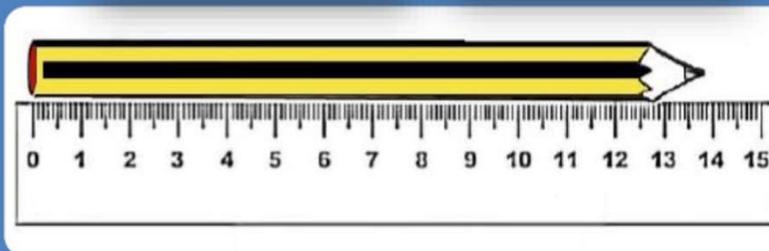
$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Clases de Mediciones

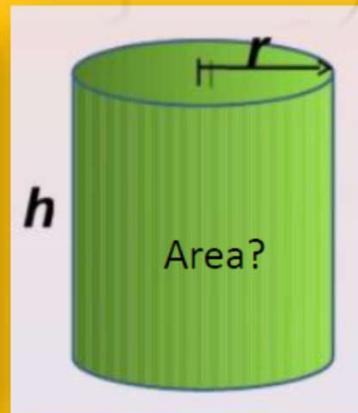
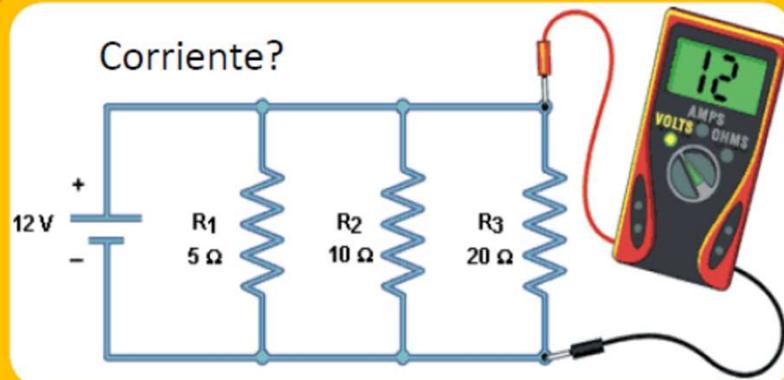
Directas (MD)

La medida deseada se obtiene de la lectura del instrumento

Ej.: medición del tiempo utilizando un cronómetro.



Clases de Mediciones



Indirectas (MI)

La medida deseada se obtiene a partir de un proceso matemático sobre otras medidas

Ej.: superficie de un cuerpo a partir de la medida de sus lados.

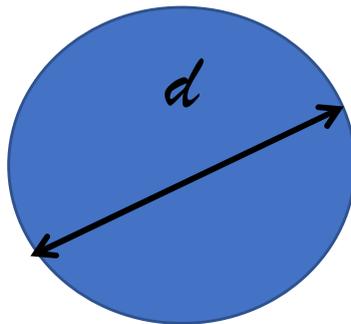


Mediciones indirectas Propagación de errores

Magnitudes con incertidumbres instrumentales

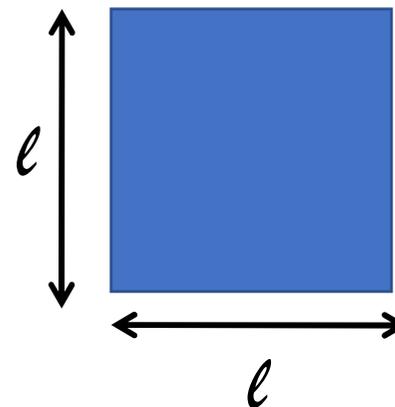
Magnitudes que no pueden ser medidas directamente con un instrumento:

Por ej: AREA de un objeto



$$A = \frac{\pi}{4} d^2$$

$$d = d_0 \pm \Delta d$$



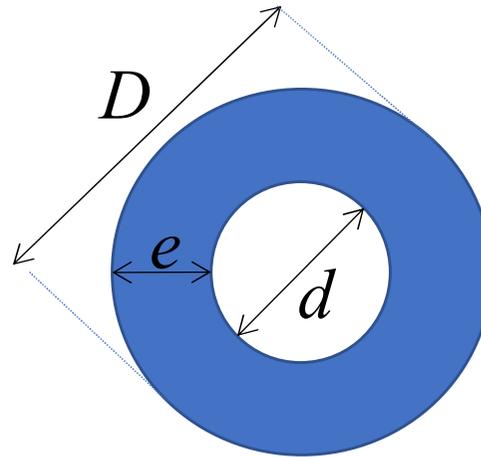
$$A = l^2$$

$$l = l_0 \pm \Delta l$$

$$A = A_0 \pm \Delta A$$

Magnitudes determinadas a partir de la medición directa de varias magnitudes

Ejemplos



$$e = D - d$$

$$e_{max} = (D_0 + \Delta D) - (d_0 - \Delta d) = D_0 - d_0 + (\Delta D + \Delta d)$$

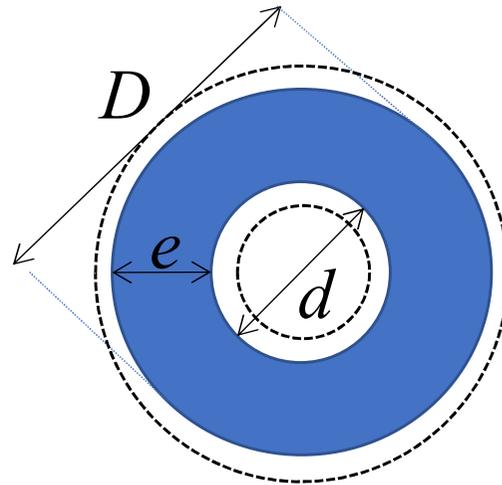
$$e_{min} = (D_0 - \Delta D) - (d_0 + \Delta d) = D_0 - d_0 - (\Delta D + \Delta d)$$

$$e = e_0 \pm \Delta e$$

$$e_0 = D_0 - d_0 \quad \Delta e = \Delta D + \Delta d$$

Magnitudes determinadas a partir de la medición directa de varias magnitudes

Ejemplos



$$e = D - d$$

$$e_{max} = (D_0 + \Delta D) - (d_0 - \Delta d) = D_0 - d_0 + (\Delta D + \Delta d)$$

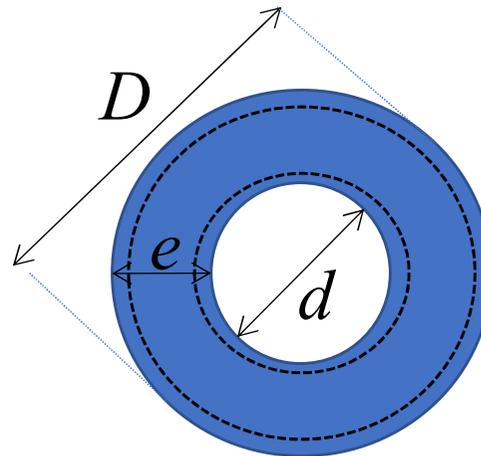
$$e_{min} = (D_0 - \Delta D) - (d_0 + \Delta d) = D_0 - d_0 - (\Delta D + \Delta d)$$

$$e = e_0 \pm \Delta e$$

$$e_0 = D_0 - d_0 \quad \Delta e = \Delta D + \Delta d$$

Magnitudes determinadas a partir de la medición directa de varias magnitudes

Ejemplos



$$e = D - d$$

$$e_{max} = (D_0 + \Delta D) - (d_0 - \Delta d) = D_0 - d_0 + (\Delta D + \Delta d)$$

$$e_{min} = (D_0 - \Delta D) - (d_0 + \Delta d) = D_0 - d_0 - (\Delta D + \Delta d)$$

$$e = e_0 \pm \Delta e$$

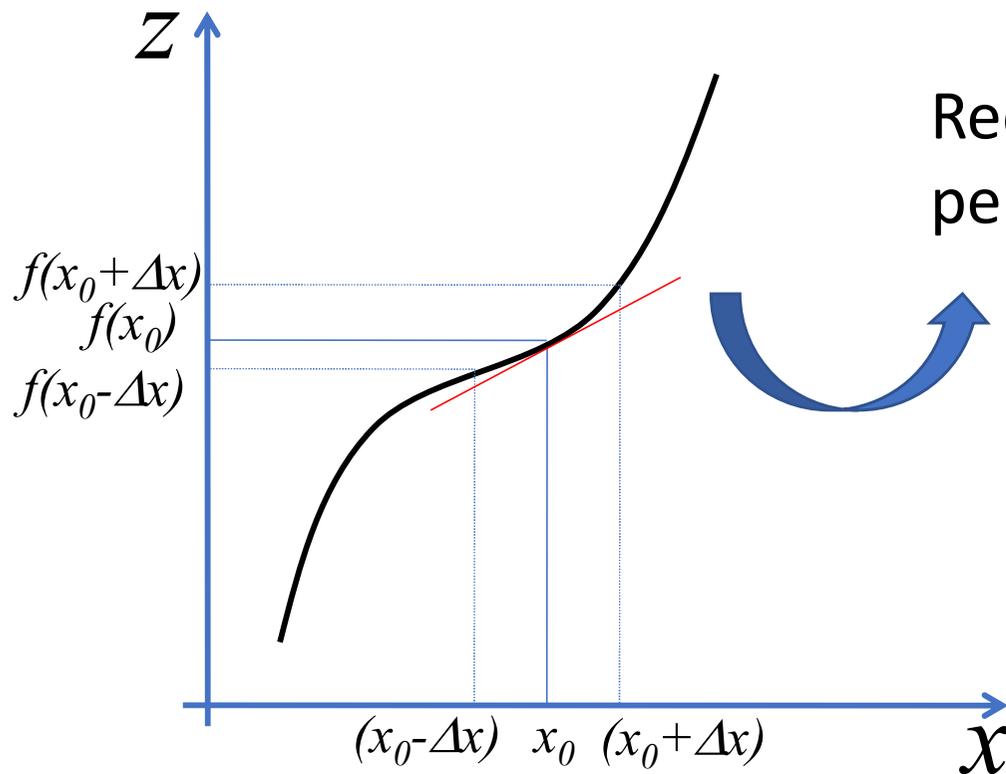
$$e_0 = D_0 - d_0 \quad \Delta e = \Delta D + \Delta d$$



Queremos determinar el valor de una magnitud z
partir de la medición directa de una magnitud x

$$z = f(x)$$

$$x = (x_0 \pm \Delta x)$$



$$z = (z_0 \pm \Delta z)$$
$$z_0 = f(x_0) \quad \Delta z = \left. \left. \frac{df}{dx} \right|_{x_0} \right| \Delta x$$



...y cómo generalizamos para una magnitud z obtenida partir de la medición directa de varias magnitudes x_i ?

$$z = f(x_1, x_2, x_3, x_4 \dots)$$

$$x_i = (x_{0,i} \pm \Delta x_i)$$

$$z = (z_0 \pm \Delta z)$$

$$z_0 = f(x_{0,1}, x_{0,2}, x_{0,3}, x_{0,4} \dots)$$

$$\Delta z^2 = \sum \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_{x_{0,i}}^2 (\Delta x_i)^2$$

Resumen

RESULTADO

$$x = \bar{x} \pm \Delta x$$

Intervalo de Confianza

$$\bar{x} - \Delta x \leq x \leq \bar{x} + \Delta x$$

$$[\bar{x} - \Delta x, \bar{x} + \Delta x]$$

\bar{x} → Valor más representativo

Δx → Incerteza Absoluta
Error Absoluto

$\varepsilon_r = \frac{\Delta x}{\bar{x}}$ → Error Relativo

$\varepsilon_{r\%} = \varepsilon_r \times 100\%$ → Error Relativo porcentual

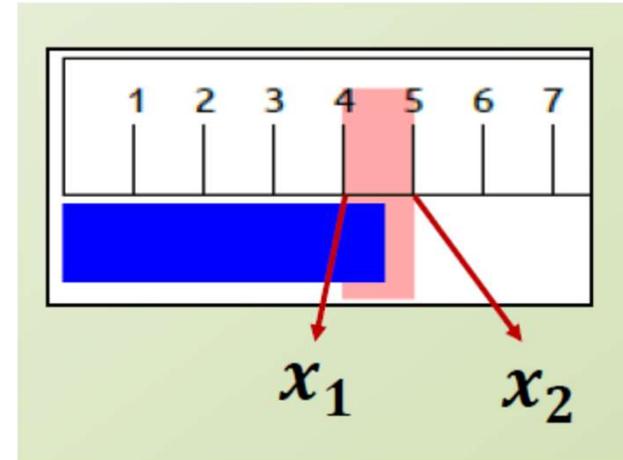
Comentario

*“El error de apreciación proviene de
la estadística que alguien hizo
previamente”*

Joaquín Sacanell

Error de apreciación

Lo que puede “resolver” el observador.
Muchas veces: resolución (mínima división) del instrumento



Incertidumbre instrumental



$$\Delta x_{ap} = (x_2 - x_1)$$

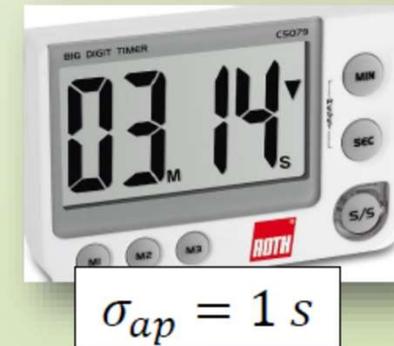
ó

$$\Delta x_{ap} = (x_2 - x_1) / 2$$

Precisión de un Instrumento

Precisión

Es la resolución del instrumento
(mínima división)



Instrumentos para determinar longitudes

- Regla, cinta métrica (en qué difieren?)
- Calibre
- Micrómetro

¿Cuál de estos instrumentos es más preciso?

Precisión instrumental vs Precisión de un resultado

PRECISIÓN DE UN INSTRUMENTO

Es la resolución del instrumento (mínima división)

PRECISIÓN DE UN RESULTADO

Error Relativo



$$\varepsilon_r = \left| \frac{\Delta x}{\bar{x}} \right|$$

- ✓ Sin Unidades
- ✓ Permite comparar resultados-métodos

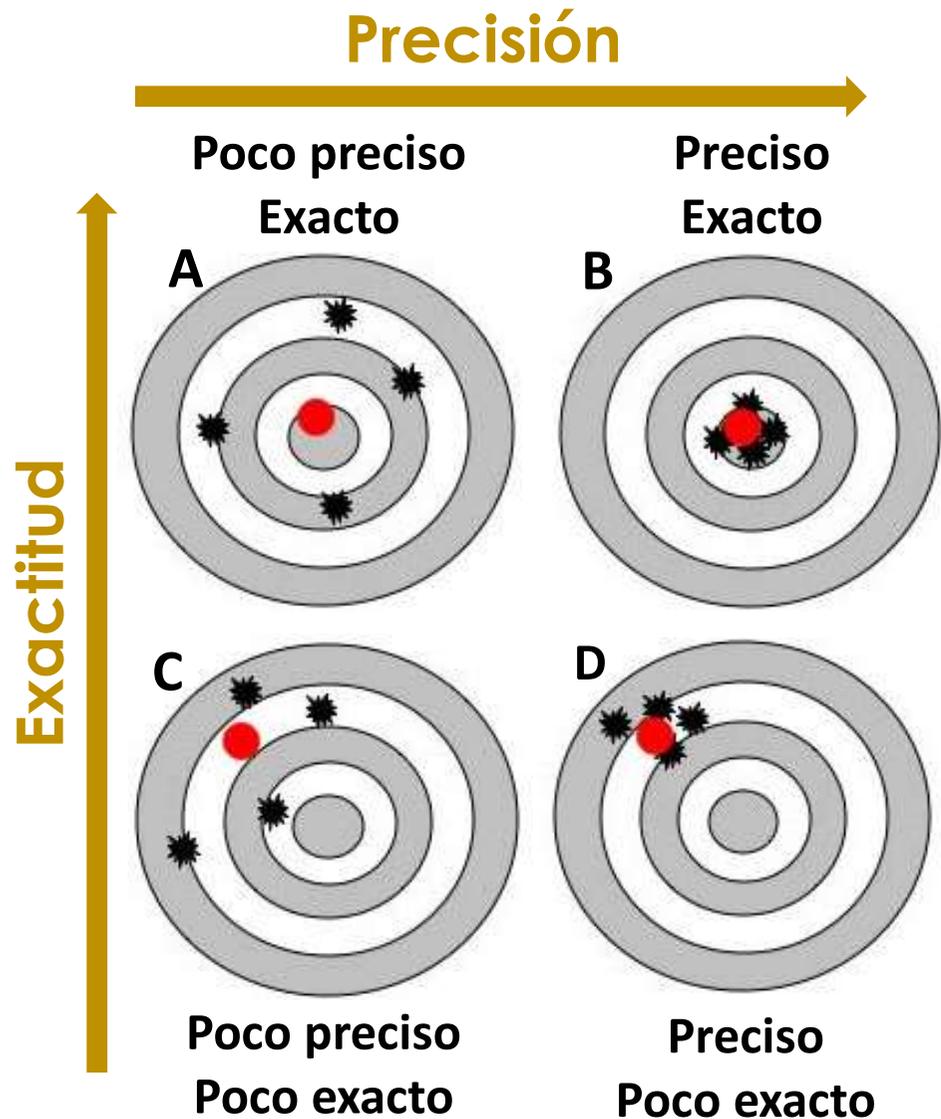
Menor $\varepsilon_r \leftrightarrow$ mayor precisión

$$D = (10 \pm 1) \text{ mm} \quad \varepsilon_{rD} = \frac{1}{10} = 0,1$$

$$M = (100 \pm 1) \text{ g} \quad \varepsilon_{rM} = \frac{1}{100} = 0,01$$

M más preciso que D

Precisión y Exactitud



● Valor más representativo

INSTRUMENTO

- **Precisión:** asociado con la mínima división que se puede resolver
- **Exactitud:** asociado con el error de calibración, método, etc

MÉTODO o RESULTADO

- **Precisión:** asociado con el Error relativo (ϵ_r)
- **Exactitud:** asociado con la cercanía del valor más representativo medido al valor tabulado o valor "real"

Cifras Significativas

Para expresar un resultado se deben incluir sólo las cifras que tienen algún significado experimental → **Cifras Significativas en Δx**

4 Cifras Significativas

0,00003400

Los 0 sin un número distinto de cero delante no son significativos

Los 0 después de un número distinto de cero son significativos

Los números distintos de 0 son significativos

2 Cifras significativas: **0,000034**

1 Cifra significativa: **0,00003**

Número	Cifras Significativas
906	3
906,00	5
0,9060	4
0,90600	5
$4,5 \times 10^3$	2
$4,50 \times 10^3$	3

2 Cifras significativas: 1 Cifra significativa:

$x_0 = 32,2408$ $x_0 = 32,24$ $x_0 = 32,2$

$\Delta x = 0,2319$ $\Delta x = 0,23$ $\Delta x = 0,2$

$x = 32,24 \pm 0,23$ $x = 32,2 \pm 0,2$

Cifras Significativas

Para expresar un resultado se deben incluir sólo las cifras que tienen algún significado experimental → **Cifras Significativas en Δx**

4 Cifras Significativas

0,00003400

Los 0 después de un número distinto de 0 no son significativos

Los 0 sin un número distinto de cero delante no son significativos

Presentaremos los resultados en base a la cantidad de cifras significativas de la incerteza

2 Cifras significativas: **0,000034**

1 Cifra significativa: **0,00003**

Número	Cifras Significativas
906	3
100	5
150	4
1500	5
$4,5 \times 10^3$	2
$4,50 \times 10^3$	3

$$x_0 = 32,2408$$

$$\Delta x = 0,2319$$

2 Cifras significativas:

$$x_0 = 32,24$$

$$\Delta x = 0,23$$

$$x = 32,24 \pm 0,23$$

1 Cifra significativa:

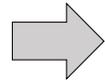
$$x_0 = 32,2$$

$$\Delta x = 0,2$$

$$x = 32,2 \pm 0,2$$

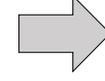
Redondeo

Si el número que se suprime es < 5 el número anterior **no cambia**



$$x_0 = 32,2408$$

$$\Delta x = 0,2319$$



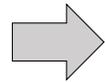
$$x_0 = 32,24$$

$$\Delta x = 0,23$$

$$x = 32,24 \pm 0,23$$

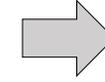
2 Cifras significativas

Si el número que se suprime es ≥ 5 al número anterior **se le suma 1**



$$x_0 = 18,8561$$

$$\Delta x = 1,3802$$



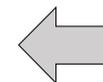
$$x_0 = 18,9$$

$$\Delta x = 1,4$$

$$x = 18,9 \pm 1,4$$

2 Cifras significativas

x_0	Δx	$x_0 \pm \Delta x$
1,259	0,020381	1,260 \pm 0,020
0,26953	0,00538	0,2695 \pm 0,0054
199	1,259	199,0 \pm 1,3
199	12,59	199 \pm 13
199	125,9	200 \pm 130
29	0,2653	29,00 \pm 0,27
19625	221	19630 \pm 220



Ejemplos de reporte de Resultados con **2 Cifras significativas**

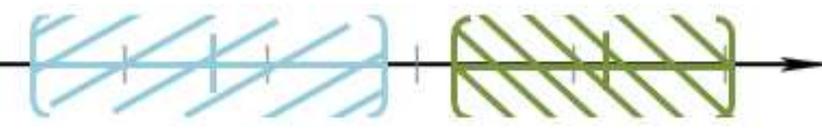
Diferencias Significativas

MÉTODO "GRÁFICO" sirve para comparar más de 2 resultados al mismo tiempo

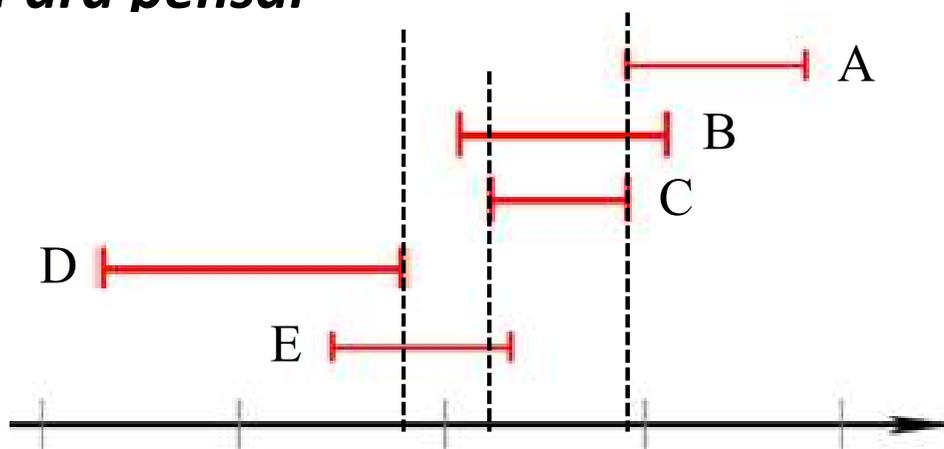
 $A = \bar{A} \pm \Delta A$

 $B = \bar{B} \pm \Delta B$

Si $A \cap B \neq \emptyset$  \Rightarrow A y B **NO PRESENTAN** Diferencias Significativas

Si $A \cap B = \emptyset$  \Rightarrow A y B **PRESENTAN** Diferencias Significativas

Para pensar



Comparando D con A, B y C: Presentan diferencias significativas, porque:

$$D \cap A = \emptyset, D \cap B = \emptyset \text{ y } D \cap C = \emptyset$$

¿Qué ocurre entre D y E?

¿Y entre A y B, A y C, y A y E?

¿Y entre B y C, y B y E?

Diferencias Significativas

MÉTODO “MATEMÁTICO”: Se puede usar de a pares de resultados

$$A = \bar{A} \pm \Delta A \quad B = \bar{B} \pm \Delta B$$

Si $|\bar{A} - \bar{B}| \leq \Delta A + \Delta B \Rightarrow$ A y B **NO PRESENTAN**
Diferencias Significativas

Para pensar

$$A = 2,278 \pm 0,023$$

$$B = 1,964 \pm 0,019$$

$$C = 2,11 \pm 0,34$$

Comparando A con B. Presentan diferencias significativas, porque:

$$|\bar{A} - \bar{B}| = 0,314 \quad \text{y} \quad \Delta A + \Delta B = 0,042$$

Como $0,314 > 0,042 \Rightarrow$ A y B presentan diferencias significativas

¿Qué ocurre entre B y C? ¿Y entre A y C?