

# Cálculo Diferencial e Integral en varias variables

Santiago Sierra

12 de mayo de 2022

## Índice

<b>1. Números Complejos</b>	<b>3</b>
1.1. Suma y Producto de números complejos . . . . .	3
1.2. Conjugado de un complejo . . . . .	3
1.3. Módulo . . . . .	4
1.4. Forma Polar . . . . .	4
1.4.1. Argumento . . . . .	4
1.4.2. Operaciones en Forma Polar . . . . .	4
1.5. Raíces de un numero complejo . . . . .	4
1.5.1. Raíz cuadrada . . . . .	4
1.5.2. Raíces complejas . . . . .	5
<b>2. Ecuaciones Diferenciales</b>	<b>6</b>
2.1. Ecuación diferencial de variables separables . . . . .	6
2.2. Solución de una ecuación diferencial con condiciones o datos iniciales . . . . .	6
2.3. Ecuación diferencial lineal de primer orden homogénea . . . . .	6
2.4. Ecuación diferencial lineal de primer orden no homogénea . . . . .	7
2.4.1. Método de variación de constante . . . . .	7
2.5. Ecuación diferencial lineal de segundo orden a coeficientes constantes y homogénea . . . . .	8
2.5.1. Solución general de la ecuación lineal homogénea de segundo orden . . . . .	8
2.6. Ecuación diferencial lineal de segundo orden a coeficientes constantes no homogénea . . . . .	8
2.6.1. Método de coeficientes indeterminados . . . . .	8
<b>3. Sucesiones y Series</b>	<b>9</b>
3.1. Sucesiones . . . . .	9
3.1.1. Convergencia . . . . .	9
3.1.2. Monotonía . . . . .	10
3.1.3. Acotación . . . . .	10
3.1.4. Sub-sucesión . . . . .	10
3.1.5. Punto de acumulación . . . . .	10
3.2. Series . . . . .	11
3.2.1. Serie geométrica . . . . .	11
3.2.2. Serie armónica . . . . .	11
3.2.3. Serie telescópica . . . . .	12
3.2.4. Series de términos positivos. . . . .	12
3.2.5. Series alternadas. . . . .	13
<b>4. Integrales impropias</b>	<b>14</b>
4.1. Integrales impropias de 1 <sup>ra</sup> especie . . . . .	14
4.2. Integrales impropias de 2 <sup>da</sup> especie . . . . .	16
4.3. Integrales mixtas . . . . .	17

<b>5. Funciones de varias variables</b>	<b>18</b>
5.1. Topología . . . . .	18

# 1. Números Complejos

**Definición 1.1.** Un numero complejo es un numero de forma  $z = a + bi$  y  $a, b \in \mathbb{R}$ , donde  $i^2 = -1$ , conocemos los números reales  $a$  y  $b$  como parte real e imaginaria respectivamente del numero  $z$ .

$$Re(z) = a \quad Im(z) = b$$

Se le llama  $i$  a la unidad imaginaria. Esta expresión que describimos se le llama forma binómica del numero.

**Definición 1.2.** Dos números complejos  $z, w$  son iguales si y solo si

$$Re(z) = Re(w) \text{ y } Im(z) = Im(w)$$

## 1.1. Suma y Producto de números complejos

**Definición 1.3.** Dados dos números complejos  $z = a + bi$  y  $w = c + di$  definimos la suma de  $z + w$  y el producto  $zw$  mediante:

$$\begin{aligned} z + w &= (a + bi) + (c + di) = (a + c) + (b + d)i \\ zw &= (a + bi)(c + di) = ac + adi + bci + bdi^2 = (ac - bd) + (ad + bci)i \end{aligned}$$

Ejemplo:

$$(1 - i) + (4 + 7i) = (1 + 4) + (-1 + 7)i = 5 + 6i$$

$$(-1 + 3i)(2 - 5i) = (-1)(2 - 5i) + (3i)(2 - 5i) = (-2 + 5i) + (6i - 15i^2) = (-2 + 5i) + (15 + 6i) = 13 + 11i$$

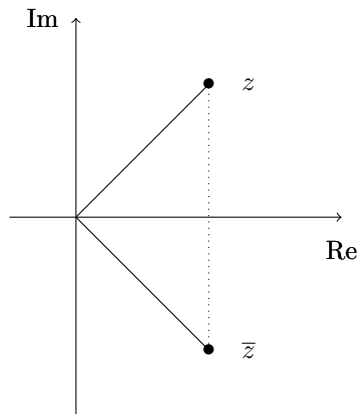
**Propiedades.** Sean  $z, w, v \in \mathbb{C}$

1. Conmutativas:  $z + w = w + z$  y  $zw = wz$
2. Asociativas:  $(z + w) + v = z + (w + v)$  y  $(zw)v = z(wv)$
3. Cada numero complejo  $z = a + bi$  tiene un elemento opuesto,  $-z = -a - bi$ , tal que  $z + (-z) = 0$
4. Distributiva (del producto respecto a la suma)  $z(w + v) = zw + zv$ .

## 1.2. Conjugado de un complejo

**Definición 1.4.** Sea  $z = a + bi$  un numero complejo. Se define el conjugado de  $z$  y se representa por  $\bar{z}$ , como el numero complejo  $\bar{z} = a - bi$ .

Geoméricamente, un complejo  $z = a + bi$  se representa por el punto  $P = (a, b)$ , y su conjugado  $\bar{z} = a - bi$  por el punto  $P' = (a, -b)$



Propiedades:

1.  $\bar{\bar{z}} = z$
2.  $\overline{z_1 + z_2} = \bar{z}_1 + \bar{z}_2$
3.  $\overline{z_1 z_2} = \bar{z}_1 \bar{z}_2$
4. Si  $z_2 \neq 0$ ,  $\overline{\left(\frac{z_1}{z_2}\right)} = \frac{\bar{z}_1}{\bar{z}_2}$
5.  $|z|^2 = z\bar{z} = Re(z)^2 + Im(z)^2$ . Por lo tanto,  $|z|^2 \geq 0 \quad \forall z \neq 0$
6.  $z + \bar{z} = 2Re(z)$
7.  $z - \bar{z} = 2i Im(z)$

Observación, para dividir dos números complejos  $\frac{z}{w}$ , basta con multiplicar el numerador y denominador por el conjugado del denominador.

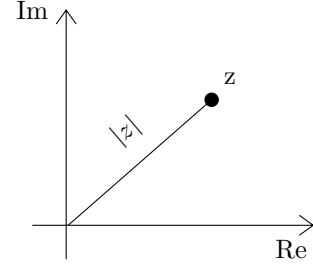
$$\frac{z}{w} = \frac{z\bar{w}}{w\bar{w}} = \frac{z\bar{w}}{|w|^2}$$

### 1.3. Módulo

**Definición 1.5.** Definimos el módulo de un complejo  $z = a + bi$  como el número real  $|z| = \sqrt{a^2 + b^2}$

Propiedades del módulo. Sean  $z_1$  y  $z_2$  números complejos:

1.  $|z| = 0$  si, y sólo si,  $z = 0$
2.  $|z| = |\bar{z}|$
3.  $|z_1 z_2| = |z_1| |z_2|$
4. Si  $z \neq 0$ ,  $|\frac{z_1}{z_2}| = \frac{|z_1|}{|z_2|}$
5. **Desigualdad triangular:**  $|z_1 + z_2| \leq |z_1| + |z_2|$



### 1.4. Forma Polar

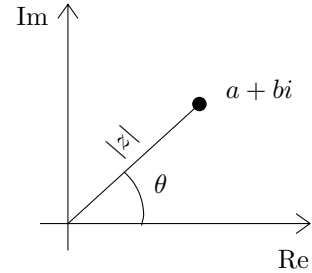
Sabemos que cualquier complejo  $z = a + bi$  puede ser considerado un punto  $(a, b)$  y que cualquier punto de este tipo puede representarse con coordenadas polares  $(r, \theta)$  con  $r \geq 0$ .

**Definición 1.6.** Cualquier complejo  $z$  se puede representar como  $z = r(\cos(\theta) + i \sen(\theta)) = re^{i\theta}$ , lo cual llamaremos forma polar. Siendo  $r = |z|$  y  $\theta = \arg(z)$ .

#### 1.4.1. Argumento

**Definición 1.7.** Definimos el argumento de  $z$  como la función

$$\arg(z) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{b}{a}\right) & a > 0 \\ \arctan\left(\frac{b}{a}\right) + \pi & b \geq 0, a < 0 \\ \arctan\left(\frac{b}{a}\right) - \pi & b < 0, a < 0 \\ +\frac{\pi}{2} & b > 0, a = 0 \\ -\frac{\pi}{2} & b < 0, a = 0 \end{cases}$$



#### 1.4.2. Operaciones en Forma Polar

**Definición 1.8.** Sean  $z_1 = r_1(\cos(\theta_1) + i \sen(\theta_1))$  y  $z_2 = r_2(\cos(\theta_2) + i \sen(\theta_2))$ , definimos su multiplicación como  $z_1 z_2 = r_1 r_2 (\cos(\theta_1 + \theta_2) + i \sen(\theta_1 + \theta_2))$

**Definición 1.9.** Definimos la división de dos complejos como  $\frac{z_1}{z_2} = \frac{r_1}{r_2} (\cos(\theta_1 - \theta_2) + i \sen(\theta_1 - \theta_2))$

Observación: Si  $z = r(\cos(\theta) + i \sen(\theta))$  entonces  $\frac{1}{z} = \frac{1}{r} (\cos(\theta) + i \sen(\theta))$

**Teorema 1.1.** Teorema de De Moivre.

Sea  $z = r(\cos(\theta) + i \sen(\theta))$  y  $n \in \mathbb{Z}^+$ , entonces  $z^n = (r(\cos(\theta) + i \sen(\theta)))^n = r^n (\cos(n\theta) + i \sen(n\theta))$

### 1.5. Raíces de un numero complejo

#### 1.5.1. Raíz cuadrada

Si deseamos hallar  $\sqrt{a + bi}$  una forma rápida de hacerlo es diciendo:

$$\sqrt{a + bi} = c + di \rightarrow a + bi = (c + di)^2 = c^2 - d^2 + 2cdi \rightarrow \begin{cases} a = c^2 - d^2 \\ b = 2cd \end{cases}$$

### 1.5.2. Raíces complejas

Sea  $z^n = r(\cos(\theta) + i \operatorname{sen}(\theta))$  y  $n \in \mathbb{Z}^+$ . Entonces,  $z$  tiene  $n$  raíces enésimas distintas. Las raíces se hallan como:

$$z_k = r^{\frac{1}{n}} \left( \cos \left( \frac{\theta + 2k\pi}{n} \right) + i \operatorname{sen} \left( \frac{\theta + 2k\pi}{n} \right) \right) = r^{\frac{1}{n}} e^{\frac{\theta + 2k\pi}{n} i}$$

Donde  $k = \{0, 1, 2, \dots, n-1\}$ .

## 2. Ecuaciones Diferenciales

**Definición 2.1.** Una ecuación diferencial es una igualdad en la cual la incógnita es una función desconocida y sus derivadas,  $y = f(x)$  definida y derivable.

Le llamamos ecuación de orden 1 si la única derivada de la función desconocida que aparece es la derivada primera, de orden 2 si la derivada de mayor orden que aparece es 2 y así sucesivamente.

### 2.1. Ecuación diferencial de variables separables

**Definición 2.2.** Una ecuación diferencial se le llama de variables separables si es de la forma  $y' = A(y)B(x)$

Solución:

$$\frac{y'(x)}{A(y(x))} = B(x) \rightarrow \int \frac{y'(x)}{A(y(x))} dx = \int B(x) dx + C \rightarrow \int \frac{dy}{A(y)} = \int B(x) dx + C$$

### 2.2. Solución de una ecuación diferencial con condiciones o datos iniciales

Por lo general existen infinitas soluciones a una misma ecuación diferencial, sin embargo si se dan datos iniciales apropiados, por lo general existe una única función solución que cumple los datos.

En una ecuación diferencial de primer orden se le llama dato inicial a una condición del tipo:  $y(x_0) = 0$ . Donde  $x_0$  e  $y_0$  son valores reales dados.

En una ecuación diferencial de segundo orden se le llaman datos iniciales a dos condiciones del tipo:  $y(x_0) = y_0$ ,  $y'(x_1) = y_1$ . Donde  $x$  e  $y$  son valores reales dados.

Para determinar la solución que verifica los datos iniciales, primero tendremos que haber hallado todas las soluciones (esto no quiere decir haber despejado la función).

Al conjunto de todas las soluciones se le llama solución general, la cual depende usualmente de una constante arbitraria si la ecuación es de primer orden, o de 2 si es de segundo orden.

### 2.3. Ecuación diferencial lineal de primer orden homogénea

**Definición 2.3.** Se llama ecuación diferencial lineal de primer orden homogénea a una ecuación del tipo:  $y' + a(x)y = 0$

Solución general:

$$y' = -a(x)y \rightarrow \frac{y'}{y} = -a(x) \rightarrow \int \frac{dy}{y} = - \int a(x) dx \rightarrow \log(y) = - \int a(x) dx + C$$
$$y = e^{- \int a(x) dx + C} = K e^{- \int a(x) dx}$$

Siendo  $K$  la variable arbitraria.

## 2.4. Ecuación diferencial lineal de primer orden no homogénea

**Definición 2.4.** Se llama ecuación diferencial lineal de primer orden no homogénea a una ecuación del tipo:  $y' + a(x)y = r(x)$ , siendo  $r(x) \neq 0$ , si no, sería homogénea.

Solución:

1. Hallar la solución general,  $y_h(x)$  de la ecuación diferencial lineal homogénea correspondiente, es decir la misma ecuación diferencial, pero sustituyendo  $r(x)$  por la función nula.
2. Hallar una solución particular de la ecuación  $y_p(x)$  diferencial dada usando el método de variación de constante.
3. Sumar  $y(x) = y_h(x) + y_p(x)$

### 2.4.1. Método de variación de constante

Para hallar la solución particular  $y_p(x)$  de la ecuación diferencial, probaremos con una función de cierto tipo como se describe:

1. Tomaremos  $y_p(x) = y_h(x)$ , con la diferencia de que la constante arbitraria, ahora será una función desconocida a determinar.
2. Sustituimos  $y_p(x)$  en la ecuación no homogénea dada, haciendo que la verifique y despejando la función. De todas las posibles funciones que se despejen (en general son infinitas), habrá que elegir solo una.
3. Una vez hallada la función, la sustituimos en la expresión  $y_p(x)$  para obtener la solución particular buscada.

#### Ejemplo:

Sea  $y' - \cos(x)y = \cos(x)$

Hallamos  $y' - \cos(x)y = 0 \rightarrow y_h = Ke^{\sin(x)}$

Decimos por el paso 2, que  $y_p(x) = y_h(x)$  pero con la constante arbitraria como función, así que

$$\begin{aligned}y_p(x) &= K(x)e^{\sin(x)} \\(K(x)e^{\sin(x)})' - \cos(x)K(x)e^{\sin(x)} &= \cos(x) \\K'(x)e^{\sin(x)} + K(x)\cos(x)e^{\sin(x)} - \cos(x)K(x)e^{\sin(x)} &= \cos(x) \\K'(x)e^{\sin(x)} &= \cos(x) \rightarrow K'(x) = \cos(x)e^{-\sin(x)} \\K(x) &= \int \cos(x)e^{-\sin(x)} dx + C = -e^{-\sin(x)} + C\end{aligned}$$

Ahora, elegimos la solución con  $C = 0$  y reemplazamos la función en  $y_p(x)$

$$y_p(x) = K(x)e^{\sin(x)} = -e^{-\sin(x)}e^{\sin(x)} = -e^{\sin(x)-\sin(x)} = -e^0 = -1$$

Por lo tanto,  $y(x) = y_h(x) + y_p(x) = Ke^{\sin(x)} - 1$

## 2.5. Ecuación diferencial lineal de segundo orden a coeficientes constantes y homogénea

**Definición 2.5.** Una ecuación diferencial de segundo orden se llama lineal a coeficientes constantes y homogénea si es de la forma  $y'' + ay' + by = 0$ , donde  $a$  y  $b$  son constantes dadas independientes.

**Teorema 2.1.** Estructura vectorial de las soluciones de la ecuación lineal homogénea.

Todas las funciones solución de la ecuación diferencial de segundo orden homogénea forman un espacio vectorial de dimensión 2.

Soluciones exponenciales: Buscaremos soluciones  $y(x) = e^{\lambda x}$ , donde  $\lambda$  es una constante real a determinar, que sean solución de la ecuación diferencial  $y'' + ay' + by = 0$ . Sustituyendo en la ecuación diferencial  $y = e^{\lambda x}$ ,  $y' = \lambda e^{\lambda x}$ ,  $y'' = \lambda^2 e^{\lambda x}$ , se obtiene:  $(\lambda^2 + a\lambda + b)e^{\lambda x} = 0 \Leftrightarrow \lambda^2 + a\lambda + b = 0$ . Siendo  $\lambda$  raíz de la ecuación de segundo grado, llamada ecuación característica.

### 2.5.1. Solución general de la ecuación lineal homogénea de segundo orden

Una vez encontradas las raíces de la ecuación característica, hay 3 casos.

- A) La ecuación característica tiene dos raíces distintas. La solución general es:  $y(x) = C_1 e^{\lambda_1 x} + C_2 e^{\lambda_2 x}$
- B) La ecuación característica tiene una raíz doble. La solución general es:  $y(x) = e^{\lambda x}(C_1 + C_2 x)$
- C) La ecuación característica tiene dos raíces complejas conjugadas de la forma  $\alpha \pm i\beta$ . La solución general es:  $y(x) = e^{\alpha x}(C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x))$

## 2.6. Ecuación diferencial lineal de segundo orden a coeficientes constantes no homogénea

**Definición 2.6.** Una ecuación diferencial de segundo orden se llama lineal a coeficientes constantes y no homogénea si es del tipo:  $y'' + ay' + by = r(x)$ .

Solución:

1. Hallar la solución general de  $y_h(x)$  de la ecuación lineal homogénea correspondiente.
2. Hallar una solución particular  $y_p(x)$  de la ecuación no homogénea dada usando el método de coeficientes indeterminados.
3. Sumar  $y(x) = y_h(x) + y_p(x)$

### 2.6.1. Método de coeficientes indeterminados

1. Si  $r(x) = e^{kx}P(x)$ , donde  $P(x)$  es un polinomio de grado  $n$ , probar  $y(x) = e^{kx}Q(x)$ , donde  $Q(x)$  es un polinomio de grado  $n$  con coeficientes a determinar sustituyendo  $y_p(x)$  en la ecuación diferencial.
2. Si  $r(x) = e^{kx}P(x)\cos(mx)$  o  $r(x) = e^{kx}P(x)\sin(mx)$ , donde  $P$  es un polinomio de grado  $n$ , probar  $y_p(x) = e^{kx}Q(x)\cos(mx) + e^{kx}R(x)\sin(mx)$ , donde  $Q$  y  $R$  son polinomio de grado  $n$ .

Si algún término de  $y_p(x)$  es también término de  $y_h(x)$ , hay que multiplicar  $y_p$  por  $x$ , o  $x^2$  si es término 2 veces.

**Teorema 2.2.** Sea una ecuación diferencial  $y'' + ay' + by = r(x)$  donde  $r(x)$  es una función conocida que puede descomponerse como suma  $r(x) = r_1(x) + r_2(x)$ . Se consideran las ecuaciones diferenciales auxiliares:

$$y_{1p} \rightarrow y'' + ay' + by = r_1(x)$$

$$y_{2p} \rightarrow y'' + ay' + by = r_2(x)$$

Siendo  $y_p(x) = y_{1p} + y_{2p}$ .

Este teorema puede aplicarse tantas veces como  $r(x)$  pueda descomponerse, habiendo una suma de tres o mas sumandos en vez de dos como se mostró.



### 3. Sucesiones y Series

#### 3.1. Sucesiones

**Definición 3.1.** Las sucesiones son funciones  $a : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$ , donde a cada natural, se le asocia un real  $a_n$ .

Ejemplos:

1. Sucesión armónica:  $a_n = \frac{1}{n}$
2.  $a_0 = 1, a_1 = 1, a_n = a_{n-1} + a_{n-2}$
3. Sucesión CTE:  $a_n = c \forall n \in \mathbb{N}$
4. Sucesión identidad:  $a_n = n \forall n \in \mathbb{N}$

##### 3.1.1. Convergencia

**Definición 3.2.** Limite de una sucesión.

Una sucesión  $a_n$  tiene el limite  $L$  y se escribe como

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = L \text{ o } a_n \rightarrow L \text{ cuando } n \rightarrow \infty$$

$$\text{Si } \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = L \begin{cases} = L \text{ (finito)} & \text{En este caso converge } (\mathbb{C}) \\ = \infty & \text{En este caso diverge } (\mathbb{D}) \\ & \text{En este caso oscila } (\mathbb{O}) \end{cases}$$

Y para todo  $\epsilon > 0$  hay un correspondiente entero  $N$  tal que si  $n > N$  entonces  $|a_n - L| < \epsilon$

Ejemplos

1.  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{n} = 0$ .
2.  $a_n = C \forall n \rightarrow \lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = c$
3.  $a_n = n \forall n \in \mathbb{N} \rightarrow \lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = +\infty$
4.  $a_n = (-1)^n \forall n \in \mathbb{N}$

**Teorema 3.1.** Si  $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = L$  y  $f(n) = a_n$  cuando  $n$  es un entero, entonces  $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = L$ .

Propiedades:

1. Si  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = L, \lim_{n \rightarrow +\infty} b_n = M \Rightarrow (a_n + b_n)_{n \in \mathbb{N}}$  es convergente y  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n + b_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} a_n + \lim_{n \rightarrow +\infty} b_n = L + M$ .
2.  $(\lambda a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  es convergente si  $\lim_{n \rightarrow +\infty} (\lambda a_n) = \lambda L$ .
3.  $(a_n b_n)_{n \in \mathbb{N}}$  es convergente si  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n b_n = LM$
4. Si  $b_n \neq 0 \forall n \in \mathbb{N}, M \neq 0, (\frac{a_n}{b_n})_{n \in \mathbb{N}}$  es convergente y  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_n}{b_n} = \frac{L}{M}$

**Teorema 3.2.** Si  $\lim_{n \rightarrow \infty} |a_n| = 0$ , entonces  $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$

**Teorema 3.3.** Si  $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = L$  y la función  $f$  es continua en  $L$ , entonces

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f(a_n) = f(L)$$

### 3.1.2. Monotonía

**Definición 3.3.** Una sucesión  $a_n$  se le llama monótona creciente si  $a_n \leq a_{n+1}$  para toda  $n \geq 1$ . Y se le denomina monótona decreciente si  $a_n \geq a_{n+1}$ .

**Corolario 3.3.1.** Si  $a_{n+1} > a_n \forall n \in \mathbb{N}$  es monótona estrictamente creciente. Si  $a_{n+1} < a_n \forall n \in \mathbb{N}$  es monótona estrictamente decreciente.

### 3.1.3. Acotación

**Definición 3.4.** Una sucesión  $a_n$  esta acotada superiormente si existe un numero  $M$  tal que  $a_n \leq M$  para toda  $n \geq 1$ .

Esta acotada inferiormente si existe un numero  $m$  tal que  $m \leq a_n$  para toda  $n \geq 1$ .

Si esta acotada superior e inferiormente, entonces  $a_n$  es una sucesión acotada.

**Teorema 3.4.** Teorema de la sucesión monótona.

Toda sucesión monótona y acotada es convergente.

Obs: Si  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  es monótona decreciente y acotada, entonces  $\lim a_n = \inf\{a_1, a_2, \dots\}$ .

### 3.1.4. Sub-sucesión

**Definición 3.5.** Dada una sucesión  $a_n$  y otra extricadamente creciente  $(x_n) : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ , llamaremos sub-sucesión de  $a_n$  a la sucesión  $a \circ x : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$ , y lo denotamos como  $a_{x_n}$ .

**Teorema 3.5.** Si  $\lim a_n = L$ , entonces toda sub-sucesión de  $a_n$  converge a  $L$ .

### 3.1.5. Punto de acumulación

**Definición 3.6.** Sea una sucesión  $a_n$ , y su sub-sucesión  $a_{n_k}$ ,  $h$  es un punto de aglomeración si  $a_{n_k} \rightarrow h$ .

**Teorema 3.6.** Teorema de Bolzano Weirstrass.

Todo conjunto infinito y acotado tiene (al menos) un punto de acumulación.

**Corolario 3.6.1.** El punto de acumulación no tiene por que pertenecer al conjunto.

**Teorema 3.7.** Toda sub-sucesión  $a_n$  acotada tiene una sub-sucesión convergente.

**Corolario 3.7.1.** Sea  $\{a_n\}$  una sucesión de términos positivos ( $a_n > 0 \forall n$ ).

Si  $\lim \frac{a_{n+1}}{a_n} = L \begin{cases} < 1 & \text{Entonces } a_n \text{ converge a } 0 \\ > 1 & \text{Entonces } a_n \text{ diverge} \end{cases}$

Obs: Si  $L = 1$  no se puede decir nada.

**Teorema 3.8.** Una función  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  es continua en  $a \in \mathbb{R}$ .

$\Leftrightarrow$  para toda sucesión  $a_n$  tal que  $\lim a_n = a$  se tiene que  $\lim f(a_n) = f(a)$ .

$$(\forall a_n, a_n \rightarrow a \Rightarrow f(a_n) = f(a))$$

### 3.2. Series

**Definición 3.7.** En general, si se trata de sumar los términos de una sucesión infinita  $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ , se obtiene una expresión de la forma

$$a_1 + a_2 + a_3 + \cdots + a_n + \cdots$$

que se denomina serie y se denota con el símbolo

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n \text{ o } \sum a_n$$

**Definición 3.8.** Dada una serie  $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ , sea  $s_n$  la n-ésima suma parcial:

$$s_n = \sum_{i=1}^n a_i$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} s_n = \lim_{n \rightarrow \infty} (a_1, a_2, \dots, a_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \sum_{k=1}^n a_k \right) \begin{cases} = L \text{ (finito)} & \text{Decimos que la serie converge } (\mathbb{C}) \text{ y } \sum_{n=1}^{\infty} a_n = L \\ = \infty & \text{Decimos que la serie diverge } (\mathbb{D}) \\ & \text{La serie oscila } (\mathbb{O}) \end{cases}$$

$$\text{Obs: } \sum_{n=0}^{\infty} a_n = \sum_{n=0}^{k-1} a_n + \sum_{n=k}^{\infty} a_n$$

#### 3.2.1. Serie geométrica

La serie geométrica

$$\sum_{n=0}^{\infty} aq^n = \sum_{n=1}^{\infty} aq^{n-1}$$

es convergente si  $|q| < 1$  y su suma es

$$\sum_{n=0}^{\infty} aq^n = \sum_{n=1}^{\infty} aq^{n-1} = \frac{a}{1-q}$$

Si  $|q| \geq 1$ , la serie geométrica es divergente.

En el caso

$$\sum_{n=n_0}^{\infty} aq^n = \frac{aq^{n_0}}{1-q}$$

**Teorema 3.9.** Si  $\sum a_n$  converge, entonces  $a_n \rightarrow 0$ .

Cuidado que es una condición necesaria pero no suficiente. Concluir la convergencia de la serie a partir de que  $\lim a_n = 0$  es un grave error.

#### 3.2.2. Serie armónica

**Teorema 3.10.** Convergencia de serie-p.

$$\text{Sea una serie } \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^p} = \begin{cases} p > 1 & \mathbb{C} \\ p \leq 1 & \mathbb{D} \end{cases}$$

### 3.2.3. Serie telescópica

Una serie telescópica es aquella serie cuyas sumas parciales poseen un número fijo de términos tras su cancelación.

Es decir, sea  $\sum a_n$  donde  $a_n = b_{n+1} - b_n$  siendo  $b_n$  otra sucesión.

Entonces  $s_n = b_{n+1} - b_0$  y  $\lim s_n = \lim b_{n+1} - b_0$ .

Un ejemplo clásico es la serie telescópica de Mengoli, que se define por  $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n(n+1)}$ , y puede calcularse según

$$\begin{aligned}\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n(n+1)} &= \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} \right) \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N \left( \frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} \right) \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \left[ \left( 1 - \frac{1}{2} \right) + \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{3} \right) + \cdots + \left( \frac{1}{N} - \frac{1}{N+1} \right) \right] \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \left[ 1 + \left( -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right) + \left( -\frac{1}{3} + \frac{1}{3} \right) + \cdots + \left( -\frac{1}{N} + \frac{1}{N} \right) - \frac{1}{N+1} \right] \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \left[ 1 - \frac{1}{N+1} \right] = 1.\end{aligned}$$

### 3.2.4. Series de términos positivos.

**Definición 3.9.** Una serie  $\sum a_n$  se dice de términos positivos, siempre que  $a_n > 0 \forall n \in \mathbb{N}$ .

Observar que en este caso, la sucesión de sumas parciales  $s_n$  es monótona creciente, por lo tanto la serie  $\sum a_n$  puede ser convergente o divergente, pero nunca oscilar.

**Teorema 3.11.** Criterio de comparación.

Sean  $\sum a_n$  y  $\sum b_n$  series de términos positivos, tales que  $a_n \leq b_n \forall n > n_0$ . Entonces:

1. Si  $\sum b_n \in \mathbb{C}$  entonces  $\sum a_n \in \mathbb{C}$ .
2. Si  $\sum a_n \in \mathbb{D}$  entonces  $\sum b_n \in \mathbb{D}$ .

En cualquier otro caso, no puedo afirmar nada.

**Teorema 3.12.** Criterio de equivalencia.

Sean  $\sum a_n$  y  $\sum b_n$  dos series de términos positivos.

1. Si  $\lim \frac{a_n}{b_n} = L > 0$  finito, entonces las dos series son de la misma clase.
2. Si  $\lim \frac{a_n}{b_n} = 0$  y  $\sum b_n \in \mathbb{C}$ , entonces  $\sum a_n \in \mathbb{C}$ .
3. Si  $\lim \frac{a_n}{b_n} = \infty$  y  $\sum b_n \in \mathbb{D}$  entonces  $\sum a_n \in \mathbb{D}$ .

En cualquier otro caso, no puedo concluir.

**Teorema 3.13.** Criterio del cociente.

Sea  $\sum a_n$  una serie de términos positivos, tal que existe  $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} = L$ . Entonces:

1. Si  $L < 1 \Rightarrow \sum a_n \in \mathbb{C}$
2. Si  $L > 1 \Rightarrow \sum a_n \in \mathbb{D}$

En otro caso el criterio no decide.

**Teorema 3.14.** Criterio de Cauchy.

Sea  $\sum a_n$  una serie de términos positivos, tal que existe  $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} = L$ . Entonces:

1. Si  $L < 1 \Rightarrow \sum a_n \in \mathbb{C}$
2. Si  $L > 1 \Rightarrow \sum a_n \in \mathbb{D}$

En otro caso el criterio no decide.

### 3.2.5. Series alternadas.

**Definición 3.10.** A una serie se le dice alternada si tiene sus términos alternativamente positivos y negativos. Su expresión general es de la forma  $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n a_n$  y  $a_n > 0$ .

**Definición 3.11.** Decimos que una serie  $\sum a_n$  es absolutamente convergente si y solo si  $\sum |a_n|$  es convergente.

**Teorema 3.15.** Toda serie absolutamente convergente es convergente.

**Teorema 3.16.** Convergencia dominada.

Sea  $a_n$ ,  $b_n$  y  $c_n$  tal que  $a_n < b_n < c_n \forall n$ .

Si  $\sum c_n \in \mathbb{C}$  y  $\sum a_n \in \mathbb{C}$  entonces  $\sum b_n \in \mathbb{C}$ . Además, vale que  $\sum a_n \leq \sum b_n \leq \sum c_n$ .

**Teorema 3.17.** Criterio de Leibnitz

Si  $a_n$  es una sucesión estrictamente decreciente que tiende a cero, entonces la serie alternada  $\sum (-1)^n a_n$  es convergente.

## 4. Integrales impropias

### 4.1. Integrales impropias de 1<sup>ra</sup> especie

**Definición 4.1.** Sea  $f(x)$  definida en el intervalo  $[a, \infty)$ .

Para toda  $t > a$  la función  $f(x)$  es integrable en  $[a, t]$ , y si  $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_a^t f(x)dx$  existe, decimos que la integral impropia esta definida y  $\int_a^\infty f(x)dx = \lim_{t \rightarrow \infty} \int_a^t f(x)dx$ .

1. Si  $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_a^t f(x)dx = L$  decimos que converge.
2. Si  $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_a^t f(x)dx = \pm\infty$  decimos que diverge.
3. Si  $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_a^t f(x)dx \nexists$  decimos que oscila.

**Ejemplo 4.1.** Sea  $t > 1$

$$\int_1^t \frac{1}{x^p} dx = \begin{cases} \left[ -\frac{1}{(1-p)x^{p-1}} \right]_1^t & \text{Si } p \neq 1 \\ [\log(x)]_1^t & \text{Si } p = 1 \end{cases} = \begin{cases} \frac{1}{p-1} - \frac{t^{1-p}}{(p-1)} & \text{Si } p \neq 1 \\ \log(t) & \text{Si } p = 1 \end{cases}$$

Como  $\lim_{t \rightarrow \infty} \log(t) = \infty$  diverge.

Por otro lado tenemos que  $1-p < 0$  o que  $p < 1$  por lo tanto  $\lim_{t \rightarrow \infty} t^{1-p} = \infty$ , y si  $1-p < 0$  o  $p > 1$  nos da que  $\lim_{t \rightarrow \infty} t^{1-p} = 0$ .

En conclusión,  $\int_1^\infty \frac{1}{x^p} dx$  diverge si  $p \leq 1$  y converge si  $p > 1$ .

**Definición 4.2.** De manera análoga también podemos definir integrales impropias de la forma:

1.  $\int_{-\infty}^b f(x)dx = \lim_{t \rightarrow -\infty} \int_t^b f(x)dx$
2.  $\int_{-\infty}^\infty f(x)dx = \int_{-\infty}^a f(x)dx + \int_a^\infty f(x)dx$

**Corolario 4.0.1.** Álgebra de integrales impropias de primera especie.

Sean  $\int_a^\infty f(x)dx$  y  $\int_a^\infty g(x)dx$  dos integrales impropias convergentes, y sea  $\lambda \in \mathbb{R}$ , se cumple que:

1. La integral  $\int_a^\infty f(x) + g(x) dx$  converge, y ademas

$$\int_a^\infty f(x) + g(x) dx = \int_a^\infty f(x)dx + \int_a^\infty g(x)dx$$

2. La integral  $\int_a^\infty \lambda f(x)dx$  converge y ademas

$$\int_a^\infty \lambda f(x)dx = \lambda \int_a^\infty f(x)dx$$

**Corolario 4.0.2.** Aplicando la proposición anterior, si  $\int_a^\infty f(x)dx$  converge y  $\int_a^\infty g(x)dx$  diverge, entonces  $\int_a^\infty f(x) + g(x) dx$  diverge.

**Corolario 4.0.3.** Si  $\int_a^\infty f(x)dx$  y  $\int_a^\infty g(x)dx$  divergen, no podemos decir nada de su suma.

**Teorema 4.1.** Sea  $f(x)$  definida en  $[a, \infty)$  una función no negativa e integrable en  $[a, b]$  para  $b \geq a$ . Consideremos la función  $F(b) = \int_a^b f(x)dx$  para  $b \in [a, \infty)$ . Entonces las siguientes afirmaciones se cumplen:

1. La función  $F$  en  $[a, \infty)$  es monótona creciente.
2.  $\int_a^\infty f(x)dx$  converge si y solo si,  $F$  esta acotada superiormente.

**Teorema 4.2.** Teorema de comparación

Sea  $0 \leq f(x) \leq g(x)$  en  $[a, \infty)$

1. Si  $\int_a^\infty g(x)dx$  converge, entonces  $\int_a^\infty f(x)dx$  también.
2. Si  $\int_a^\infty f(x)dx$  diverge, entonces  $\int_a^\infty g(x)dx$  también.

**Teorema 4.3.** Criterio de equivalencia

Sean  $f, g$  funciones definidas en  $[a, \infty)$  que cumplen:

- $f(x) \geq 0$  y  $g(x) > 0 \forall x \geq a$ . Es decir,  $f$  es no negativa y  $g$  positiva en  $[a, \infty)$ .
- $f$  y  $g$  son integrables en  $[a, b]$  para  $b \geq a$ .

Consideremos  $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{g(x)} = L$ .

Entonces cumplen las afirmaciones:

1. Si  $L > 0$ , se tiene que  $\int_a^\infty f(x)dx$  y  $\int_a^\infty g(x)dx$  son del mismo tipo, es decir ambos convergen o divergen. Si  $L > 0$ , decimos que las funciones  $f$  y  $g$  son equivalentes.
2. Para el caso  $L = 0$ :
  - $\int_a^\infty g(x)dx$  converge  $\Rightarrow \int_a^\infty f(x)dx$  converge.
  - $\int_a^\infty f(x)dx$  diverge  $\Rightarrow \int_a^\infty g(x)dx$  diverge.
3. Para el caso  $L = \infty$ :
  - $\int_a^\infty g(x)dx$  diverge  $\Rightarrow \int_a^\infty f(x)dx$  diverge.
  - $\int_a^\infty f(x)dx$  converge  $\Rightarrow \int_a^\infty g(x)dx$  converge.

**Definición 4.3.** Sea  $f(x)$  definida en  $[a, \infty)$  una función integrable en  $[a, b]$  para  $b \geq a$ . Decimos que  $\int_a^\infty f(x)dx$  es absolutamente convergente si  $\int_a^\infty |f(x)|dx$  converge.

**Teorema 4.4.** Sea  $f(x)$  definida en  $[a, \infty)$  una función integrable en  $[a, b]$  para  $b \geq a$  tal que  $\int_a^\infty f(x)dx$  es absolutamente convergente. Entonces  $\int_a^\infty f(x)dx$  converge.

**Definición 4.4.** Sea  $f(x)$  definida en  $[a, \infty)$  una función integrable en  $[a, b]$  para  $b \geq a$ , diremos que  $\int_a^\infty f(x)dx$  es condicionalmente convergente si  $\int_a^\infty f(x)dx$  converge pero  $\int_a^\infty |f(x)|dx$  diverge.

**Teorema 4.5.** Criterio serie-integral. Sea  $f(x)$  definido en  $[a, \infty)$  una función positiva, decreciente e integrable en  $[a, b]$  para  $b \geq a$ . Sea  $n_0$  el primer entero no negativo mayor o igual que  $a$ . Para cada  $n \geq n_0$ , sean

$$s_n = \sum_{k=n_0}^n f(k) \text{ y } t_n = \int_{n_0}^n f(x)dx$$

Entonces, ambas sucesiones son del mismo tipo.

## 4.2. Integrales impropias de 2<sup>da</sup> especie

**Definición 4.5.** Sea  $f(x)$  una función definida en  $[t, b]$  para  $a < t < b$ , pero no esta definida en  $[a, b]$  (o definida en  $(a, b]$ ), entonces  $\int_a^b f(x)dx$  no esta definida.

Puede pasar que  $\int_t^b f(x)dx$  este definida y existe  $\lim_{t \rightarrow a^+} \int_t^b f(x)dx$ , entonces decimos que su valor es

$$\int_{a^+}^b f(x)dx = \lim_{t \rightarrow a^+} \int_t^b f(x)dx$$

De misma manera, puede pasar que  $f(x)$  es continua en el intervalo  $[a, t]$  para  $a < t < b$  y existe  $\lim_{t \rightarrow b^-} \int_a^t f(x)dx$ , entonces

$$\int_a^{b^-} f(x)dx = \lim_{t \rightarrow b^-} \int_a^t f(x)dx$$

**Ejemplo 4.2.** Veamos nuevamente la función  $\frac{1}{x^p}$  con  $p \in \mathbb{R}$ , veamos para cuales valores de  $p$ , la integral impropia  $\int_0^1 \frac{1}{x^p} dx$  converge.

$$\int_0^1 \frac{1}{x^p} dx = \lim_{t \rightarrow 0} \int_t^1 \frac{1}{x^p} dx = \begin{cases} [\log(t)]_t^1 & \text{Si } p = 1 \\ \left[ \frac{x^{1-p}}{1-p} \right]_t^1 & \text{Si } p \neq 1 \end{cases} = \begin{cases} -\log(t) & \text{Si } p = 1 \\ \frac{1-t^{1-p}}{1-p} & \text{Si } p \neq 1 \end{cases} = \begin{cases} \infty & \text{Si } p = 1 \\ \frac{1}{1-p} & \text{Si } 0 < p < 1 \\ \infty & \text{Si } p > 1 \end{cases}$$

Por lo tanto,  $\int_0^1 \frac{1}{x^p} dx$  converge si  $p < 1$ , y diverge si  $p \geq 1$ .

**Corolario 4.5.1.** Sea  $f(x)$  una función definida en el intervalo  $(a, b)$ , e integrable en  $[c, d]$  para  $a < c \leq d < b$ . Si  $\int_{a^+}^{b^-} f(x)dx$  converge, entonces

$$\int_{a^+}^{b^-} f(x)dx = \int_{a^+}^d f(x)dx + \int_d^{b^-} f(x)dx$$

para  $\forall d \in (a, b)$ .

**Corolario 4.5.2.** Álgebra de integrales impropias de segunda especie Sean  $\int_{a^+}^b f(x)dx$  y  $\int_{a^+}^b g(x)dx$  dos integrales impropias convergentes y  $\lambda \in \mathbb{R}$ . Entonces:

1. La integral  $\int_{a^+}^b f(x) + g(x) dx$  converge y ademas

$$\int_{a^+}^b f(x) + g(x) dx = \int_{a^+}^b f(x)dx + \int_{a^+}^b g(x)dx$$

2. La integral  $\int_{a^+}^b \lambda f(x)dx$  converge y ademas

$$\int_{a^+}^b \lambda f(x)dx = \lambda \int_{a^+}^b f(x)dx$$

**Teorema 4.6.** Sea  $f(x)$  definida en  $(a, b]$  una función no negativa e integrable en  $[c, b]$ , para  $c \in (a, b]$ . Consideremos la función  $F(c) = \int_c^b f(x)dx$ . Entonces cumple:

1. La función  $F$  en  $(a, b]$  es monótona decreciente.
2.  $\int_{a^+}^b f(x)dx$  converge si y solo si  $F$  esta acotada superiormente.



**Teorema 4.7.** Criterio de comparación

Sean  $f, g$  definidas en  $(a, b]$  funciones que cumplen:

- $0 \leq f(x) \leq g(x) \forall x \in (a, b]$
- $f$  y  $g$  son integrables en  $[c, b]$  para  $c \in (a, b]$ .

Entonces cumplen:

1. Si  $\int_{a+}^b g(x)dx$  converge, entonces  $\int_{a+}^b f(x)dx$  converge.
2. Si  $\int_{a+}^b f(x)dx$  diverge, entonces  $\int_{a+}^b g(x)dx$  diverge.

**Teorema 4.8.** Criterio de equivalentes

Sean  $f, g$  funciones definidas en  $(a, b]$  que cumplen:

- $f(x) \geq 0$  y  $g(x) > 0 \forall x \in (a, b]$ .
- $f$  y  $g$  son integrables en  $[c, b] \forall c \in (a, b]$ .

Consideremos el limite

$$\lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f(x)}{g(x)} = L$$

Entonces se cumple lo siguiente:

1. Si  $L > 0$  se tiene que  $\int_{a+}^b f(x)dx$  y  $\int_{a+}^b g(x)dx$  son de la misma clase.
2. Si  $L = 0$ 
  - $\int_{a+}^b g(x)dx$  converge  $\Rightarrow \int_{a+}^b f(x)dx$  converge.
  - $\int_{a+}^b f(x)dx$  diverge  $\Rightarrow \int_{a+}^b g(x)dx$  diverge.
3. Si  $L = \infty$ 
  - $\int_{a+}^b g(x)dx$  diverge  $\Rightarrow \int_{a+}^b f(x)dx$  diverge.
  - $\int_{a+}^b f(x)dx$  converge  $\Rightarrow \int_{a+}^b g(x)dx$  converge.

**4.3. Integrales mixtas**

Cuando en una integral aparece mas de un punto problemático, debemos partir la integral en una suma de integrales que contengan solamente uno de esos puntos, y decimos que la integral original es convergente si y solo si cada uno de los sumandos lo es.

De esta forma por ejemplo si  $f$  es continua, la integral impropia  $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx$  debemos escribirla como suma de  $\int_{-\infty}^a f(x)dx$  y  $\int_a^{+\infty} f(x)dx$ , y debemos clasificar estas dos integrales. Es fácil ver que el resultado no depende de  $a$ .

**Definición 4.6.** Sea  $f(x)$  definida en  $(a, \infty)$  una función integrable en todo subintervalo  $[b, c] \subseteq (a, \infty)$ . A la expresión  $\int_{a+}^{\infty} f(x)dx$  se le conoce como integral impropia mixta.

## 5. Funciones de varias variables

$$\mathbb{R}^n = \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \cdots \mathbb{R} = \{(x_1, x_2, \dots, x_n) : x_i \in \mathbb{R}\}$$

Función escalar

$$f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \text{ (codominio } \mathbb{R})$$

Ejemplos:

$$f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R} / f(x, y) = xy$$

$$T : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} / T(x_1, x_2, \dots, x_n) = x_1 + x_2 + \cdots + x_n$$

$$f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R} / f(x, y) = x^2 + xy$$

**Definición 5.1.** Función escalar Una función escalar es una función cuyo dominio esta incluido en  $\mathbb{R}^n$  y codominio  $\mathbb{R}$ .

**Definición 5.2.** Función vectorial Una función vectorial es una función con dominio en  $\mathbb{R}^n$  y codominio en  $\mathbb{R}^m$ .

$$\text{Para } f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m / f(x_1, x_2, \dots, x_n) = (f_1(x_1, x_2, \dots, x_n), \dots, f_m(x_1, \dots, x_n))$$

Notación:  $f = (f_1, f_2, \dots, f_m)$

Cada  $f_i : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  es una función escalar  $\forall i = 1, \dots, m$  y se llama en este contexto función coordenada.

Sea  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ , el grafico de  $f$  es el conjunto  $G(f) = \{(x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}) \in \mathbb{R}^n : (x_1, x_2, \dots, x_n) \in A, x_{n+1} = f(x_1, x_2, \dots, x_n)\}$ .

### 5.1. Topología

**Definición 5.3.** Norma Una norma en  $\mathbb{R}^n$  es una función  $|| \cdot || : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  que cumple:

- $||x|| \geq 0 \forall x \in \mathbb{R}^n$
- $||x|| = 0 \Leftrightarrow x = \vec{0}$
- $||\lambda x|| = |\lambda| ||x|| \forall x \in \mathbb{R}^n \forall \lambda \in \mathbb{R}$
- $||x + y|| \leq ||x|| + ||y|| \forall x, y \in \mathbb{R}^n$

**Definición 5.4.** Una distancia en  $\mathbb{R}^n$  es una función  $d : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  tal que:

- $d(x, y) \geq 0 \forall x, y \in \mathbb{R}^n$
- $d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$
- $d(x, y) = d(y, x) \forall x, y \in \mathbb{R}^n$
- $d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y) \forall x, y, z \in \mathbb{R}^n$

**Definición 5.5.** Sea  $|| \cdot ||$  una norma en  $\mathbb{R}^n$ . La distancia inducida por  $|| \cdot ||$  se define como:

$$d(x, y) = ||x - y||$$

Normas en  $\mathbb{R}^2$

- $||x||_2 = ||(x, y)||_2 = \sqrt{x^2 + y^2}$  (norma euclidiana)
- $||x||_1 = ||(x, y)|| = |x| + |y|$  (norma 1 o del taxista)
- $||x||_\infty = ||(x, y)||_\infty = \max\{|x|, |y|\}$  (norma infinito)

**Definición 5.6.**

Sea  $d$  una distancia en  $\mathbb{R}^n$ . Sea  $a \in \mathbb{R}^n$  y  $\gamma > 0$ .

La bola abierta de centro  $a$  y radio  $\gamma$  es el conjunto

$$B(a, \gamma) = \{x \in \mathbb{R}^n : d(a, x) < \gamma\}$$

La bola cerrada de centro  $a$  y radio  $\gamma$  es el conjunto

$$B[a, \gamma] = \{x \in \mathbb{R}^n : d(a, x) \leq \gamma\}$$

La esfera de centro  $a$  y radio  $\gamma$  es el conjunto

$$E[a, \gamma] = \{x \in \mathbb{R}^n : d(a, x) = \gamma\}$$

**Corolario 5.0.1.**  $B(a, \gamma) \cup E[a, \gamma] = B[a, \gamma]$ .