

# Notación sigma

**Definición:** Sea  $a, b \in \mathbb{R}$  y  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ , definimos a la sumatoria como sigue:

$$\sum_{n=a}^b f(n) := \begin{cases} f(a) + \sum_{n=a+1}^b f(n), & \text{si } b \geq a \\ 0, & \text{si } b < a. \end{cases}$$

Decimos que

- $n$  es el índice,
- $a$  el límite inferior,
- $b$  el límite superior,
- $f(n)$  el elemento típico (o genérico)

de la sumatoria. También decimos que  $n$  *itera* desde  $a$  hasta  $b$ .

**Ejemplos:**

1.

$$\begin{aligned} \sum_{i=2}^5 i^2 &= (2)^2 + \sum_{i=3}^5 i^2 \\ &= 4 + (3)^2 + \sum_{i=4}^5 i^2 \\ &= 4 + 9 + (4)^2 + \sum_{i=5}^5 i^2 \\ &= 4 + 9 + 16 + (5)^2 + \sum_{i=6}^5 i^2 \\ &= 4 + 9 + 16 + 25 + 0 \\ &= 54 \end{aligned} \tag{*}$$

2.

$$\begin{aligned} \sum_{m=-3}^{-1} 2m &= 2(-3) + \sum_{m=-2}^{-1} 2m \\ &= -6 + 2(-2) + \sum_{m=-1}^{-1} 2m \\ &= -6 + -4 + 2(-1) + \sum_{m=0}^{-1} 2m \\ &= -6 + -4 + -2 + 0 \\ &= -12 \end{aligned} \tag{†}$$

3.

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=0}^3 2^n &= 2^0 + \sum_{n=1}^3 2^n \\
 &= 1 + 2^1 + \sum_{n=2}^3 2^n \\
 &= 1 + 2 + \sum_{n=3}^3 2^n \quad (\ddagger) \\
 &= 1 + 2 + 2^3 + \sum_{n=4}^3 2^n \\
 &= 1 + 2 + 8 + 0 \\
 &= 11
 \end{aligned}$$

4.

$$\sum_{j=0}^{-1} j = 0$$

5.

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=1}^3 \frac{k}{n+1} &= \frac{k}{(1)+1} + \sum_{n=2}^3 \frac{k}{n+1} \\
 &= \frac{k}{2} + \frac{k}{(2)+1} + \sum_{n=3}^3 \frac{k}{n+1} \\
 &= \frac{k}{2} + \frac{k}{3} + \frac{k}{(3)+1} + \sum_{n=4}^3 \frac{k}{n+1} \\
 &= \frac{k}{2} + \frac{k}{3} + \frac{k}{4} + 0 \\
 &= \frac{k}{2} + \frac{k}{3} + \frac{k}{4}
 \end{aligned}$$

El lector notará que, en el caso en que los límites inferior y superior son iguales  $(*, \dagger, \ddagger)$ , la imagen de la sumatoria es el elemento típico *evaluado* en el índice, es decir,

**Observación:** Si  $a = b$ , entonces

$$\sum_{n=a}^b f(n) = f(n) \quad (\text{Índices iguales de la sumatoria})$$

**Demostración:** Sea  $m \in \mathbb{R}$ ,

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=m}^m f(n) &= f(m = n) + \sum_{n=m+1}^m f(n) && \text{Definición} \\
 &= f(n) + 0 && \text{Definición} \\
 &= f(n)
 \end{aligned}$$

□

**Nota:** En este caso, el índice *itera* en un único valor.

A partir de esto tenemos que:

$$\sum_{n=a}^b f(n) = \begin{cases} f(a) + \sum_{n=a+1}^b f(n), & \text{si } a < b. \\ f(n) & , \text{ si } a = b \\ 0 & , \text{ si } a > b \end{cases}$$

El lector notará también que la suma del primer termino hasta el ultimo es igual a la suma del ultimo hasta el primero, es decir,

**Proposición:** Sea  $(b - a) \in \mathbb{N}$  arbitrario pero fijo, entonces

$$\sum_{n=a}^b f(n) = f(b) + \sum_{n=a}^{b-1} f(n) \quad (\text{Sumatoria inversa})$$

**Demostración:**

**I)** Se verifica para  $(b - a) = 1$ ,

$$\begin{aligned} \sum_{n=a}^{a+1} f(n) &= f(a) + \sum_{n=a+1}^{a+1} f(n) && \text{Definición} \\ &= f(a) + \sum_{n=b}^b f(n) && \text{Hipótesis} \\ &= f(a) + f(b) \\ &= f(b) + \sum_{n=a}^a f(n) \\ &= f(b) + \sum_{n=a}^{b-1} f(n) && b - a = 1 \Rightarrow b - 1 = a \end{aligned}$$

**II)** Supongamos que si  $b - a = k$ , entonces

$$\sum_{n=a}^b f(n) = f(b) + \sum_{n=a}^{b-1} f(n)$$

**III)** Notemos que si  $b - a = k + 1$ , se tiene que

$$\begin{aligned} \sum_{n=a}^{a+k+1} f(n) &= f(a) + \sum_{n=a+1}^{a+k+1} f(n) && \text{Definición} \\ &= f(a) + f(a+k+1) + \sum_{n=a+1}^{a+k} f(n) && \text{Hip. Ind.} \\ &= f(a+k+1) + f(a) + \sum_{n=a+1}^{a+k} f(n) \\ &= f(a+k+1) + \sum_{n=a}^{a+k} f(n) && \text{Definición} \\ &= f(b) + \sum_{n=a}^{b-1} f(n) \end{aligned}$$

□

**Observación:** Sea  $a, b \in \mathbb{R}$ .

- Si  $b = a$ , entonces  $b - a \in \{0\}$ , y por índices iguales de la sumatoria se tiene que  $\sum_{n=a}^b f(n) = f(n)$ .
- Por definición, si  $b < a$  se tiene que  $\sum_{n=a}^b f(n) = 0$ , que en particular se verifica si  $b - a \in \{-n : n \in \mathbb{N}\}$ .

A partir de esta observación y de la Sumatoria Inversa se tiene que

**Definición:** Si  $(b - a) \in \mathbb{Z}$ , entonces

$$\sum_{n=a}^b f(n) := \begin{cases} 0 & , \text{ si } a > b \\ f(n) & , \text{ si } a = b \\ f(b) + \sum_{n=a}^{b-1} f(n), & \text{ si } a < b. \end{cases}$$

De este modo, siempre que la *distancia* entre los límites de la sumatoria sea un número entero, contaremos con una definición alternativa para la sumatoria. Dado que contamos con una definición que puede ser planteada de dos maneras, podemos utilizar cualquiera (de las dos) a conveniencia; por ejemplo:

$$\begin{aligned} \sum_{n=-1}^1 n^3 &= (-1)^3 + \sum_{n=0}^1 n^3 & \sum_{n=-1}^1 n^3 &= 1^3 + \sum_{n=-1}^0 n^3 \\ &= -1 + 0^3 + \sum_{n=1}^1 n^3 & &= 1 + 0^3 + \sum_{n=-1}^{-1} n^3 \\ &= -1 + 0 + 1^3 & &= 1 + 0 + (-1)^3 \\ &= 0 & &= 0 \end{aligned}$$

## Lista de Ejercicios 11 (LE11)

Sea  $a, b, p, q, s, t \in \mathbb{Z}$ , demuestre lo siguiente:

a)

$$\sum_{n=p}^q g(n) + \sum_{n=s}^t h(n) = \sum_{n=s}^t h(n) + \sum_{n=p}^q g(n) \quad (\text{Conmutatividad de la sumatoria})$$

**Demostración:**

I. Primero probaremos que  $\left(\sum_{n=a}^b f(n)\right) \in \mathbb{R}, \forall n \in \mathbb{Z}$ , es decir, que la imagen de la sumatoria siempre es un número real; la motivación es que, al estar definida *recursivamente*, la función podría parecer asignar números reales a funciones, pero este no es el caso.

Por definición, si  $a > b$ , entonces,  $\left(\sum_{n=a}^b f(n)\right) = 0 \in \mathbb{R}$ ; si  $a = b$ , entonces  $\left(\sum_{n=a}^b f(n)\right) = f(n) \in \mathbb{R}$ . Para el caso  $a < b$  procedemos por inducción:

i) Se verifica para  $b = a + 1$ ,

$$\begin{aligned} \sum_{n=a}^b f(n) &= \sum_{n=a}^{a+1} f(n) \\ &= f(n+1) + \sum_{n=a}^a f(n) \\ &= f(n+1) + f(n) \end{aligned}$$

Como  $f(n+1) \in \mathbb{R}$  y  $f(n) \in \mathbb{R}$  y la suma es cerrada en  $\mathbb{R}$  se tiene que  $(f(n+1) + f(n)) \in \mathbb{R}$ , osea,  $\left(\sum_{n=a}^b f(n)\right) \in \mathbb{R}$ .

- ii) Supongamos que  $\left(\sum_{n=a}^b f(n)\right) \in \mathbb{R}$ , con  $b = a + k$ , para algún  $k \in \mathbb{N}$ .  
 iii) Si  $b = a + k + 1$ ,

$$\begin{aligned}\sum_{n=a}^b f(n) &= \sum_{n=a}^{a+k+1} f(n) \\ &= f(n+k+1) + \sum_{n=a}^{a+k} f(n) \\ &= f(n+k+1) + \sum_{n=a}^{a+k} f(n)\end{aligned}$$

Como  $f(n+k+1) \in \mathbb{R}$  y  $\sum_{n=a}^{a+k} f(n) \in \mathbb{R}$  (hip. ind.), se tiene que  $\left(f(n+k+1) + \sum_{n=a}^{a+k} f(n)\right) \in \mathbb{R}$ , es decir,  $\left(\sum_{n=a}^b f(n)\right) \in \mathbb{R}$ .

En cualquier caso  $\left(\sum_{n=a}^b f(n)\right) \in \mathbb{R}$ .

**II.** Finalmente demostramos la Conmutatividad de la sumatoria.

Como  $\left(\sum_{n=p}^q g(n)\right) \in \mathbb{R}$  y  $\left(\sum_{n=s}^t h(n)\right) \in \mathbb{R}$ , por conmutatividad de la suma en  $\mathbb{R}$ , sigue que

$$\sum_{n=p}^q g(n) + \sum_{n=s}^t h(n) = \sum_{n=s}^t h(n) + \sum_{n=p}^q g(n)$$

□

**Corolario:**

$$\sum_{n=p}^q g(n) \cdot \sum_{n=s}^t h(n) = \sum_{n=s}^t h(n) \cdot \sum_{n=p}^q g(n)$$

**Demostración:** Como  $\left(\sum_{n=p}^q g(n)\right) \in \mathbb{R}$  y  $\left(\sum_{n=s}^t h(n)\right) \in \mathbb{R}$ , la igualdad se verifica por la conmutatividad de la multiplicación en  $\mathbb{R}$ . □

b)

$$\sum_{n=a}^b f(n) + \sum_{n=a}^b g(n) = \sum_{n=a}^b \left(f(n) + g(n)\right) \quad (\text{Asociatividad de la sumatoria})$$

**Demostración:**

I) Si  $a > b$ ,

$$\sum_{n=a}^b f(n) + \sum_{n=a}^b g(n) = 0 = \sum_{n=a}^b \left(f(n) + g(n)\right)$$

II) Si  $a = b$ ,

$$\sum_{n=a}^b f(n) + \sum_{n=a}^b g(n) = f(n) + g(n) = \sum_{n=a}^b \left(f(n) + g(n)\right)$$

III) Si  $b > a$ ,

i) Se comprueba para  $b = a + 1$ ,

$$\begin{aligned}
\sum_{n=a}^{a+1} (f(n) + g(n)) &= (f(a) + g(a)) + \sum_{n=a+1}^{a+1} (f(n) + g(n)) \\
&= f(a) + g(a) + (f(a+1) + g(a+1)) \\
&= (f(a) + f(a+1)) + (g(a) + g(a+1)) && \text{Asociatividad (de la suma)} \\
&= \left( f(a) + \sum_{n=a+1}^{a+1} f(n) \right) + \left( g(a) + \sum_{n=a+1}^{a+1} g(n) \right) \\
&= \sum_{n=a}^{a+1} f(n) + \sum_{n=a}^{a+1} g(n)
\end{aligned}$$

ii) Supongamos que se verifica para  $b = a + k$ , con  $k \in \mathbb{N}$ , es decir, suponemos que

$$\sum_{n=a}^{a+k} (f(n) + g(n)) = \sum_{n=a}^{a+k} f(n) + \sum_{n=a}^{a+k} g(n)$$

iii) Notemos que

$$\begin{aligned}
\sum_{n=a}^{a+k+1} (f(n) + g(n)) &= (f(a+k+1) + g(a+k+1)) + \sum_{n=a}^{a+k} (f(n) + g(n)) \\
&= f(a+k+1) + g(a+k+1) + \sum_{n=a}^{a+k} f(n) + \sum_{n=a}^{a+k} g(n) && \text{Hip. Inducción} \\
&= \left( f(a+k+1) + \sum_{n=a}^{a+k} f(n) \right) + \left( g(a+k+1) + \sum_{n=a}^{a+k} g(n) \right) \\
&= \sum_{n=a}^{a+k+1} f(n) + \sum_{n=a}^{a+k+1} g(n)
\end{aligned}$$

□

c) Sea  $c \in \mathbb{R}$ ,

$$c \cdot \sum_{n=a}^b f(n) = \sum_{n=a}^b (c \cdot f(n)) \quad (\text{Distributividad de la sumatoria})$$

**Demostración:**

I) Si  $a > b$ ,

$$c \cdot \sum_{n=a}^b f(n) = c \cdot 0 = \sum_{n=a}^b (c \cdot f(n))$$

II) Si  $a = b$ ,

$$c \cdot \sum_{n=a}^b f(n) = c \cdot f(n) = \sum_{n=a}^b (c \cdot f(n))$$

III) Si  $b > a$ ,

i) Se comprueba para  $b = a + 1$ ,

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=a}^{a+1} (c \cdot f(n)) &= c \cdot f(a) + \sum_{n=a+1}^{a+1} c \cdot f(n) \\
 &= c \cdot f(a) + c \cdot f(a+1) \\
 &= c \cdot (f(a) + f(a+1)) \\
 &= c \cdot \left( f(a) + \sum_{n=a+1}^{a+1} f(n) \right) \\
 &= c \cdot \sum_{n=a}^{a+1} f(n)
 \end{aligned}$$

ii) Supongamos que se verifica para  $b = a + k$ , con  $k \in \mathbb{N}$ , es decir, suponemos que

$$\sum_{n=a}^{a+k} (c \cdot f(n)) = c \cdot \sum_{n=a}^{a+k} f(n)$$

iii) Notemos que

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=a}^{a+k+1} (c \cdot f(n)) &= c \cdot f(a+k+1) + \sum_{n=a}^{a+k} (c \cdot f(n)) \\
 &= c \cdot f(a+k+1) + c \cdot \sum_{n=a}^{a+k} f(n) && \text{Hip. Inducción} \\
 &= c \cdot \left( f(a+k+1) + \sum_{n=a}^{a+k} f(n) \right) \\
 &= c \cdot \sum_{n=a}^{a+k+1} f(n)
 \end{aligned}$$

□

**Corolario:** Sea  $s, t \in \mathbb{R}$

i)

$$s \cdot \sum_{n=a}^b f(n) + t \cdot \sum_{n=a}^b g(n) = \sum_{n=a}^b (s \cdot f(n) + t \cdot g(n))$$

**Demostración:**

$$\begin{aligned}
 s \cdot \sum_{n=a}^b f(n) + t \cdot \sum_{n=a}^b g(n) &= \sum_{n=a}^b (s \cdot f(n)) + \sum_{n=a}^b (t \cdot g(n)) && \text{Distributividad de la sumatoria} \\
 &= \sum_{n=a}^b (s \cdot f(n) + t \cdot g(n)) && \text{Asociatividad}
 \end{aligned}$$

□

ii)

$$\sum_{n=a}^b f(n) - \sum_{n=a}^b g(n) = \sum_{n=a}^b (f(n) - g(n))$$

**Demostración:**

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=a}^b f(n) - \sum_{n=a}^b g(n) &= \sum_{n=a}^b f(n) + (-1) \sum_{n=a}^b g(n) \\
 &= \sum_{n=a}^b (f(n) + (-1) \cdot g(n)) && \text{Por (i) de este corolario} \\
 &= \sum_{n=a}^b (f(n) - g(n))
 \end{aligned}$$



□

d)

$$\sum_{n=a}^b \left( \sum_{m=s}^t f(n, m) \right) = \sum_{m=s}^t \left( \sum_{n=a}^b f(n, m) \right)$$

**Demostración:**I) Si  $b = a$  y  $s = t$ 

$$\begin{aligned} \sum_{n=a}^b \left( \sum_{m=s}^t f(n, m) \right) &= \sum_{n=a}^a \left( \sum_{m=s}^s f(n, m) \right) \\ &= \sum_{n=a}^a f(n, s) \\ &= f(a, s) \\ &= \sum_{m=s}^s f(a, m) \\ &= \sum_{m=s}^s \left( \sum_{n=a}^a f(n, m) \right) \\ &= \sum_{m=s}^t \left( \sum_{n=a}^b f(n, m) \right) \end{aligned}$$

II) Si  $b > a$  y  $s = t$ 

$$\begin{aligned} \sum_{n=a}^b \left( \sum_{m=s}^t f(n, m) \right) &= \sum_{n=a}^b \left( \sum_{m=s}^s f(n, m) \right) \\ &= \sum_{n=a}^b f(n, s) \\ &= \\ &= \sum_{m=s}^t \left( \sum_{n=a}^b f(n, m) \right) \end{aligned}$$

III) Si  $b = a$  y  $s > t$ IV) Si  $b > a$  y  $s > t$ V) Si  $b = a$  y  $s < t$ VI) Si  $b < a$  y  $s = t$ VII) Si  $b < a$  y  $s < t$ 

□

e)

$$\sum_{n=a}^b \left( \sum_{m=s}^t (f(n) \cdot g(m)) \right) = \left( \sum_{n=a}^b f(n) \right) \cdot \left( \sum_{m=s}^t g(m) \right)$$

**Demostración:** Notemos que en la sumatoria  $\sum_{m=s}^t (f(n) \cdot g(m))$ ,  $f(n)$  es constante, por lo que

$$\sum_{n=a}^b \left( \sum_{m=s}^t (f(n) \cdot g(m)) \right) = \sum_{n=a}^b \left( f(n) \sum_{m=s}^t g(m) \right)$$

De la misma manera, en la sumatoria (de índice  $n$ )  $\sum_{n=a}^b \left( f(n) \sum_{m=s}^t g(m) \right)$ , se tiene que  $\sum_{m=s}^t g(m)$  es constante, por lo que

$$\begin{aligned} \sum_{n=a}^b \left( f(n) \sum_{m=s}^t g(m) \right) &= \left( \sum_{m=s}^t g(m) \right) \cdot \left( \sum_{n=a}^b f(n) \right) \\ &= \left( \sum_{n=a}^b f(n) \right) \cdot \left( \sum_{m=s}^t g(m) \right) \end{aligned}$$

□

f)

$$\sum_{n=a}^b \left( f(n) \cdot g(n) \right) \neq \left( \sum_{n=a}^b f(n) \right) \cdot \left( \sum_{n=a}^b g(n) \right)$$

g)

$$\sum_{n=a}^b \frac{f(n)}{g(n)} \neq \frac{\sum_{n=a}^b f(n)}{\sum_{n=a}^b g(n)}$$

h) Sea  $c \in \mathbb{R}$ , si  $a \leq b$ , entonces

$$\sum_{n=a}^b c = (b - a + 1)c$$

**Demostración:**

I) Se comprueba para  $a = b$ ,

$$\sum_{n=a}^b c = c = 1 \cdot c = (b - a + 1) \cdot c$$

II) Si  $a < b$  se tiene que

i) Se verifica para  $b = a + 1$ ,

$$\sum_{n=a}^{a+1} c = c + \sum_{n=a+1}^{a+1} c = c + c = 2c = (2 + a - a)c = (1 + 1 + a - a)c = ((a + 1) - a + 1)c$$

ii) Supongamos que se cumple para  $b = a + k$ , con  $k \in \mathbb{N}$ ; es decir, suponemos que

$$\sum_{n=a}^{a+k} c = ((a + k) - a + 1)c$$

iii) Notemos que

$$\begin{aligned} \sum_{n=a}^{a+k+1} c &= c + \sum_{n=a}^{a+k} c \\ &= c + ((a + k) - a + 1)c && \text{Hip. Inducción} \\ &= (1 + ((a + k) - a + 1))c \\ &= ((a + k + 1) - a + 1)c \end{aligned}$$

□

**Nota:** En esta proposición se restringe que  $a \leq b$ , pues si  $a > b$ , se tiene que  $\sum_{n=a}^b c = 0 \neq (b - a + 1)c$ ; únicamente en el caso que  $c = 0$ , se cumpliría la igualdad con  $a > b$ .

**Definición:**  $(b - a + 1)$  es el número de *iteraciones*, *cícl*os, o *sumandos* de la sumatoria  $\sum_{n=a}^b f(n)$ .

**Corolario:** Si  $c \in \mathbb{R}$  y  $n \in \mathbb{N}$ , entonces  $\sum_{i=1}^n c = nc$ .

**Demostración:**  $\sum_{i=1}^n c = ((n - 1) + 1)c = nc$ . □

i) Sea  $\ell, m \in \mathbb{R}$  y  $c \in \mathbb{Z}$ , encuentre las condiciones que deben cumplirse para que

$$\sum_{n=a}^b f(\ell + m \cdot n) = \sum_{n=a+c}^{b+c} f(\ell + m \cdot n - c)$$

I) Notemos que si  $c = 0$ , la proposición es *tautológica*; por lo que, en adelante, suponemos que  $c \neq 0$ .

II) Si  $a > b$ , no importa qué valores tome  $\ell$  o  $m$ , la proposición se verifica por definición:

$$\sum_{n=a}^b f(\ell + m \cdot n) = 0 = \sum_{n=a+c}^{b+c} f(\ell + m \cdot n - c)$$

III) Si  $a = b$  y  $m = 0$ ,

$$\begin{aligned} \sum_{n=a+c}^{b+c} f(\ell + m \cdot n - c) &= \sum_{n=a+c}^{a+c} f(\ell + m \cdot n - c) \\ &= f(\ell + 0 \cdot (a + c) - c) \\ &= f(\ell + 0 - c) \\ &= f(\ell - c) \\ &\neq f(\ell) \\ &= f(\ell + 0) \\ &= f(\ell + 0 \cdot a) \\ &= \sum_{n=a}^a f(\ell + m \cdot n) \\ &= \sum_{n=a}^b f(\ell + m \cdot n) \end{aligned}$$

Por lo que descartamos este caso.

IV) Si  $a = b$ ,  $m \neq 0$  y  $m \neq 1$ ,

$$\begin{aligned} \sum_{n=a+c}^{b+c} f(\ell + m \cdot n - c) &= \sum_{n=a+c}^{a+c} f(\ell + m \cdot n - c) \\ &= f(\ell + m(a + c) - c) \\ &= f(\ell + ma + mc - c) \\ &\neq f(\ell + ma) \\ &= \sum_{n=a}^a f(\ell + m \cdot n) \\ &= \sum_{n=a}^b f(\ell + m \cdot n) \end{aligned}$$

Por lo que descartamos este caso.

**V)** Si  $a = b$  y  $m = 1$ ,

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=a+c}^{b+c} f(\ell + m \cdot n - c) &= \sum_{n=a+c}^{a+c} f(\ell + m \cdot n - c) \\
 &= f(\ell + 1 \cdot (a + c) - c) \\
 &= f(\ell + a) \\
 &= f(\ell + 1 \cdot a) \\
 &= \sum_{n=a}^a f(\ell + m \cdot n) \\
 &= \sum_{n=a}^b f(\ell + m \cdot n)
 \end{aligned}$$

**VI)** Si  $a < b$  y  $m = 0$ .

Para  $b = a + 1$  se tiene

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=a}^b f(\ell + m \cdot n) &= \sum_{n=a}^{a+1} f(\ell + m \cdot n) \\
 &= f(\ell + 0 \cdot (a + 1)) + \sum_{n=a}^a f(\ell + 0 \cdot n) \\
 &= f(\ell + 0 \cdot (a + 1)) + f(\ell + 0 \cdot a) \\
 &= f(\ell) + f(\ell) \\
 &= 2f(\ell) \\
 &\neq 2f(\ell - c) \\
 &= f(\ell - c) + f(\ell - c) \\
 &= f(\ell + 0 \cdot (a + c) - c) + f(\ell + 0 \cdot (a + c + 1) - c) \\
 &= f(\ell + 0 \cdot (a + c) - c) + \sum_{n=a+c+1}^{a+c+1} f(\ell + m \cdot n - c) \\
 &= \sum_{n=a+c}^{(a+1)+c} f(\ell + m \cdot n - c) \\
 &= \sum_{n=a+c}^{b+c} f(\ell + m \cdot n - c)
 \end{aligned}$$

Por lo que descartamos este caso.

**VII)** Si  $a < b$ ,  $m \neq 0$  y  $m \neq 1$ , Para  $b = a + 1$  se tiene

$$\begin{aligned}
\sum_{n=a}^b f(\ell + m \cdot n) &= \sum_{n=a}^{a+1} f(\ell + m \cdot n) \\
&= f(\ell + m \cdot (a + 1)) + \sum_{n=a}^a f(\ell + m \cdot n) \\
&= f(\ell + m \cdot (a + 1)) + f(\ell + m \cdot a) \\
&= f(\ell + ma + m) + f(\ell + ma) \\
&\neq f(\ell + ma + mc - c) + f(\ell + ma + mc + m - c) \\
&= f(\ell + m \cdot (a + c) - c) + f(\ell + m \cdot (a + c + 1) - c) \\
&= f(\ell + m \cdot (a + c) - c) + \sum_{n=a+c+1}^{a+c+1} f(\ell + m \cdot n - c) \\
&= \sum_{n=a+c}^{(a+1)+c} f(\ell + m \cdot n - c) \\
&= \sum_{n=a+c}^{b+c} f(\ell + m \cdot n - c)
\end{aligned}$$

Por lo que descartamos este caso.

**VIII)** Si  $a < b$ ,  $m = 1$ ,

**i)** Si  $b = a + 1$ ,

$$\begin{aligned}
\sum_{n=a}^b f(\ell + m \cdot n) &= \sum_{n=a}^{a+1} f(\ell + n) \\
&= f(\ell + (a + 1)) + \sum_{n=a}^a f(\ell + n) \\
&= f(\ell + a + 1) + f(\ell + a) \\
&= f(\ell + a + 1) + f(\ell + (a + c) - c) \\
&= f(\ell + (a + 1 + c) - c) + \sum_{n=a+c}^{a+c} f(\ell + n - c) \\
&= \sum_{n=a+c}^{(a+1)+c} f(\ell + n - c) \\
&= \sum_{n=a+c}^{b+c} f(\ell + m \cdot n - c)
\end{aligned}$$

**ii)** Supongamos que se verifica para  $b = a + k$ , con  $k \in \mathbb{N}$ ; es decir, supenmos que

$$\sum_{n=a}^{a+k} f(\ell + n) = \sum_{n=a+c}^{(a+k)+c} f(\ell + n - c)$$

iii) Notemos que

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=a}^{a+k+1} f(\ell+n) &= f(\ell+(a+k+1)) + \sum_{n=a}^a f(\ell+n) \\
 &= f(\ell+a+k+1) + f(\ell+a) \\
 &= f(\ell+a+k+1) + f(\ell+(a+c)-c) \\
 &= f(\ell+(a+k+1+c)-c) + \sum_{n=a+c}^{a+c} f(\ell+n-c) \\
 &= \sum_{n=a+c}^{(a+k+1)+c} f(\ell+n-c)
 \end{aligned}$$

Por lo que en general, planteamos la proposición como sigue:

Si  $c \in \mathbb{Z}$ ,  $\ell \in \mathbb{R}$ , entonces

$$\sum_{n=a}^b f(\ell+n) = \sum_{n=a+c}^{b+c} f(\ell+n-c) \quad (\text{Cambio de límites 1})$$

j) Sea  $c \in \mathbb{Z}$ ,  $m \in \mathbb{R}$ ,

$$\sum_{n=a}^b f(m-n) = \sum_{n=a+c}^{b+c} f(m-(n-c)) \quad (\text{Cambio de límites 2})$$

***Demostración:***

i) Si  $a > b$ ,

$$\sum_{n=a}^b f(m-n) = 0 = \sum_{n=a+c}^{b+c} f(m-(n-c))$$

ii) Si  $a = b$ ,

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=a+c}^{b+c} f(m-(n-c)) &= \sum_{n=a+c}^{a+c} f(m-(n-c)) \\
 &= f(m-((a+c)-c)) \\
 &= f(m-a) \\
 &= \sum_{n=a}^a f(m-n) \\
 &= \sum_{n=a}^b f(m-n)
 \end{aligned}$$

iii) Si  $a < b$ ,

i) Se verifica para  $b = a + 1$ ,

$$\begin{aligned}
\sum_{n=a+c}^{(a+1)+c} f(m - (n - c)) &= f(m - ((a + c) - c)) + \sum_{n=a+c+1}^{a+c+1} f(m - (n - c)) \\
&= f(m - a) + f(m - ((a + c + 1) - c)) \\
&= f(m - a) + f(m - (a + 1)) \\
&= f(m - a) + f(m - a - 1) \\
&= f(m - a) + f(m - (a + 1)) \\
&= f(m - a) + \sum_{n=a+1}^{a+1} f(m - n) \\
&= \sum_{n=a}^{a+1} f(m - n)
\end{aligned}$$

ii) Supongamos que ese verifica para  $b = a + k$ , con  $k \in \mathbb{N}$ ; es decir, suponemos que

$$\sum_{n=a}^{a+k} f(m - n) = \sum_{n=a+c}^{(a+k)+c} f(m - (n - c))$$

iii) Notemos que

$$\begin{aligned}
\sum_{n=a+c}^{(a+k+1)+c} f(m - (n - c)) &= f(m - ((a + k + 1 + c) - c)) + \sum_{n=a+c}^{a+k+c} f(m - (n - c)) \\
&= f(m - (a + k + 1)) + \sum_{n=a}^{a+k} f(m - n) \quad \text{Hip. Ind.} \\
&= \sum_{n=a}^{a+k+1} f(m - n)
\end{aligned}$$

□

k) Sea  $m \in \mathbb{R}$  y  $c \in \mathbb{Z}$ ,

$$\sum_{n=a}^b f(m \pm n) = \sum_{n=a+c}^{b+c} f(m \pm (n - c)) \quad (\text{Cambio de índice})$$

**Demostración:**

i) Por el cambio de límites 1 se tiene que

$$\sum_{n=a}^b f(m + n) = \sum_{n=a+c}^{b+c} f(m + (n - c))$$

ii) Por el cambio de límites 2 se tiene que

$$\sum_{n=a}^b f(m - n) = \sum_{n=a+c}^{b+c} f(m - (n - c))$$

□

**Nota:** El lector encontrará que en ocasiones, en lugar de utilizar este teorema simplemente se trabaja con susbsituciones sobre el índice, por ejemplo:

$$\sum_{i=1}^n (i - 1) = \sum_{j=0}^{n-1} j \quad \text{donde } j = i - 1$$

1) Si  $s \leq j \leq t$ ,

$$\sum_{n=s}^t f(n) = \sum_{n=s}^j f(n) + \sum_{n=j+1}^t f(n) \quad (\text{Partir la suma})$$

**Nota:** Alternativamente podemos escribir esta igualdad como sigue: Si  $s \leq j \leq t$ , entonces  $\sum_{n=s}^t f(n) = \sum_{n=s}^{j-1} f(n) + \sum_{n=j}^t f(n)$ . El lector debería verificar esta equivalencia

**Demostración:** Consideremos los casos:

I) Si  $s = j = t$ ,

$$\begin{aligned} \sum_{n=s}^t f(n) &= f(s) \\ &= f(s) + 0 \\ &= \sum_{n=s}^j f(n) + \sum_{n=j+1}^t f(n) \end{aligned}$$

II) Si  $s < j = t$ ,

$$\begin{aligned} \sum_{n=s}^t f(n) &= \sum_{n=s}^j f(n) \\ &= \sum_{n=s}^j f(n) + 0 \\ &= \sum_{n=s}^j f(n) + \sum_{n=j+1}^t f(n) \end{aligned}$$

III) Si  $s = j < t$ ,

$$\begin{aligned} \sum_{n=s}^t f(n) &= f(s) + \sum_{n=s+1}^t f(n) \\ &= \sum_{n=s}^j f(n) + \sum_{n=j+1}^t f(n) \end{aligned}$$

IV) Si  $s < j < t$ . Sea  $j \in \mathbb{Z}$  arbitrario pero fijo,

i) Si  $t = j + 1$ ,

$$\begin{aligned} \sum_{n=s}^t f(n) &= \sum_{n=s}^{j+1} f(n) \\ &= f(j+1) + \sum_{n=s}^j f(n) \\ &= \sum_{n=s}^j f(n) + f(j+1) && \text{Conmutatividad} \\ &= \sum_{n=s}^j f(n) + \sum_{n=j+1}^t f(n) \end{aligned}$$

ii) Supongamos que  $\sum_{n=s}^{j+k} f(n) = \sum_{n=s}^j f(n) + \sum_{n=j+1}^{j+k} f(n)$  para algún  $k \in \mathbb{N}$ .



iii) Si  $t = j + k + 1$ , notemos que

$$\begin{aligned}
\sum_{n=s}^t f(n) &= \sum_{n=s}^{j+k+1} f(n) \\
&= f(j+k+1) + \sum_{n=s}^{j+k} f(n) \\
&= f(j+k+1) + \sum_{n=s}^j f(n) + \sum_{n=j+1}^{j+k} f(n) && \text{Hip. Ind.} \\
&= \sum_{n=s}^j f(n) + \sum_{n=j+1}^{j+k} f(n) + f(j+k+1) \\
&= \sum_{n=s}^j f(n) + \sum_{n=j+1}^{j+k+1} f(n) \\
&= \sum_{n=s}^j f(n) + \sum_{n=j+1}^t f(n)
\end{aligned}$$

□

**Nota:** En esta proposición se restringe que  $s \leq j \leq t$ , pues la proposición no es válida para todo  $s \geq j \geq t$ :

I) Si  $s > j > t$ ,

$$\sum_{n=s}^t f(n) = 0 = \sum_{n=s}^j f(n) + \sum_{n=j+1}^t f(n)$$

II) Si  $s > j = t$ ,

$$\sum_{n=s}^t f(n) = 0 = \sum_{n=s}^j f(n) + \sum_{n=j+1}^t f(n)$$

III) Si  $s = j > t$ ,

i)  $\sum_{n=s}^j f(n) + \sum_{n=j+1}^t f(n) = f(n) + 0 = f(n).$

ii)  $\sum_{n=s}^t f(n) = 0.$

El lector notará que para partir la suma en este caso, debe cumplirse que  $f(n) = 0$ , pero esto dependerá de cada función y de los índices, por lo que en general,  $f(n) \neq 0$ , por ejemplo para cualquier sumatoria  $\sum_{n=a}^b c$ , donde  $c \neq 0$ .

**Corolario:**

$$\sum_{n=a}^b f(n) = \sum_{n=0}^b f(n) - \sum_{n=0}^{a-1} f(n)$$

**Demostración:**

$$\begin{aligned}
\sum_{n=0}^b f(n) - \sum_{n=0}^{a-1} f(n) &= \sum_{n=0}^a f(n) + \sum_{n=a+1}^b f(n) - \sum_{n=0}^{a-1} f(n) && \text{Partir la suma} \\
&= \sum_{n=0}^{a-1} f(n) + \sum_{n=a}^a f(n) + \sum_{n=a+1}^b f(n) - \sum_{n=0}^{a-1} f(n) && \text{Partir la suma} \\
&= \sum_{n=a}^a f(n) + \sum_{n=a+1}^b f(n) \\
&= \sum_{n=a}^b f(n)
\end{aligned}$$

□

m)

$$\sum_{n=a}^b f(n) = \sum_{n=0}^{b-a} f(b-n)$$

**Demostración:**

I) Si  $b < a$ , entonces  $b - a < 0$ , por lo que

$$\sum_{n=0}^{b-a} f(b-n) = 0 = \sum_{n=a}^b f(n)$$

II) Si  $b = a$ ,

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{b-a} f(b-n) &= \sum_{n=0}^0 f(b-n) \\ &= f(b-0) \\ &= f(b) \\ &= \sum_{n=a}^b f(n) \end{aligned}$$

III) Si  $b > a$ ,

i) Se verifica para  $b = a + 1$ ,

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{b-a} f(b-n) &= \sum_{n=0}^{(a+1)-a} f(a+1-n) \\ &= \sum_{n=0}^1 f(a+1-n) \\ &= f(a+1-0) + \sum_{n=1}^1 f(a+1-n) \\ &= f(a+1) + f(a+1-1) \\ &= f(a+1) + f(a) \\ &= f(a) + f(a+1) \\ &= \sum_{n=a}^{a+1} f(n) \\ &= \sum_{n=a}^b f(n) \end{aligned}$$

ii) Supongamos que se verifica para  $b = a + k$ , con  $k \in \mathbb{N}$ , es decir, suponemos que

$$\sum_{n=a}^{a+k} f(n) = \sum_{n=0}^{(a+k)-a} f(a+k-n) = \sum_{n=0}^k f(a+k-n)$$

iii) Si  $b = a + k + 1$ ,

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=a}^{a+k+1} f(n) &= f(a+k+1) + \sum_{n=a}^{a+k} f(n) \\
 &= f(a+k+1) + \sum_{n=0}^k f(a+k-n) && \text{Hip. Ind.} \\
 &= f(a+k-(-1)) + \sum_{n=0}^k f(a+k-n) \\
 &= \sum_{n=-1}^k f(a+k-n) && \text{Definición (de sumatoria)} \\
 &= \sum_{n=-1+(1)}^{k+(1)} f(a+k-(n-1)) && \text{Cambio de índice} \\
 &= \sum_{n=0}^{k+1} f(a+k+1-n)
 \end{aligned}$$

□

**Corolario:**

$$\sum_{n=0}^b f(n) = \sum_{n=0}^b f(b-n)$$

**Demostración:** La proposición se verifica por el teorema para  $a = 0$ .

□

## Una nota sobre la notación sigma

### Abuso de la notación

Considere el siguiente argumento planteado por un estudiante, y decida si está o no de acuerdo:

Para números reales  $a$  y  $b$  tales que  $a < b$ , hemos definido  $\sum_{n=a}^b f(n) = f(a) + \sum_{n=a+1}^b f(n)$ ; el lector notará que del lado izquierdo de esta igualdad  $n = a$  pero del lado derecho  $n = a + 1$ , es decir, se emplea el mismo símbolo  $n$  para números enteros distintos, lo que resulta útil en este caso ya que la definición de sumatoria está dada *recursivamente*; sin embargo, de manera minuciosa (y pedante), se podría reescribir como  $\sum_{n=a}^b f(n) = f(a) + \sum_{n+1=a+1}^b f(n+1)$ , pero en cada iteración tendríamos que cambiar el índice (inferior) y, con ello, la variable a evaluar, lo que llegaría a ser laborioso, especialmente si se requiere de expresar múltiples iteraciones; por ello, se acude al abuso mencionado.

### Extensión

Usualmente, el alcance de una suma se extiende hasta el primer símbolo de suma o resta que no está entre paréntesis o que no es parte de algún término más amplio (por ejemplo, en el numerador de una fracción), de manera que:

$$\sum_{i=1}^n i^2 + 1 = \left( \sum_{i=1}^n i^2 \right) + 1 = 1 + \sum_{i=1}^n i^2 \neq \sum_{i=1}^n (i^2 + 1)$$

dado que esto puede resultar confuso, generalmente es más seguro encerrar el argumento de la sumatoria entre paréntesis (como en la segunda forma arriba) o mover los términos finales al principio (como en la tercera forma arriba). Una excepción (a la confusión) es cuando se suman dos sumas, como en

$$\sum_{i=1}^n i^2 + \sum_{i=1}^{n^2} i = \left( \sum_{i=1}^n i^2 \right) + \left( \sum_{i=1}^{n^2} i \right)$$

# Pendiente

## Lista de Ejercicios 8 (LE8)

Sean  $a$  y  $b$  números reales, demuestre lo siguiente:

- a)  $0 \leq a^{2n} \forall n \in \mathbb{N}$ .
- b) Si  $0 \leq a$ , entonces  $0 \leq a^n, \forall n \in \mathbb{N}$ .
- c) Si  $0 \leq a < b$ , entonces  $a^n < b^n, \forall n \in \mathbb{N}$ .
- d) Si  $0 \leq a < b$ , entonces  $a^n \leq ab^n < b^n \forall n \in \mathbb{N}$ .
- e) Si  $0 < a < 1$ , entonces  $a^n < a \forall n \in \mathbb{N}$ .
- f) Si  $1 < a$ , entonces  $a < a^n \forall n \in \mathbb{N}$ .

### Demostración

- a) Pendiente
- b) Por inducción matemática.

- i) Verificamos que se cumple para  $n = 1$ .

$$\begin{aligned}0 &\leq a^1 \\0 &\leq a\end{aligned}$$

- ii) Suponemos que se cumple para  $n = k$ , para algún  $k \in \mathbb{N}$ . Es decir, suponemos que

$$0 \leq a^k$$

- iii) Probaremos a partir de (ii) que  $0 \leq a^{k+1}$ . En efecto, por hipótesis de inducción

$$\begin{aligned}0 &\leq a^k \\0 \cdot a &\leq a^k \cdot a \\0 &\leq a^{k+1}\end{aligned}$$

- c) Por inducción matemática.

- i) Verificamos que se cumple para  $n = 1$ .

$$\begin{aligned}a^1 &< b^1 \\a &< b\end{aligned}$$

- ii) Suponemos que se cumple para  $n = k$ , para algún  $k \in \mathbb{N}$ . Es decir, suponemos que

$$a^k < b^k$$

- iii) Probaremos, a partir de (ii) que  $a^{k+1} < b^{k+1}$ . En efecto, por (c) de LE5, garantizamos que  $0 \leq a^k$ , lo que nos permite, por (a) de LE5, afirmar que

$$\begin{aligned}a^k \cdot a &< b^k \cdot b \\a^{k+1} &< b^{k+1}\end{aligned}$$

- d) Tenemos que  $a < b$ , como  $0 \leq a < b$ , sigue que  $0 < b$ , entonces  $a \cdot b < b \cdot b$ , osea  $ab < b^2$ . Luego,  $a \cdot a \leq ab$ . Finalmente,  $a^2 \leq ab < b^2$ .

- e) Pendiente

f) Pendiente

**Definición:** Sea  $A$  un subconjunto no vacío de  $\mathbb{R}$ , decimos que  $A$  está acotado:

- superiormente si  $\exists M \in \mathbb{R}$  tal que  $a \leq M, \forall a \in A$ . En este caso decimos que  $M$  es cota superior de  $A$ .
- inferiormente si  $\exists m \in \mathbb{R}$  tal que  $m \leq a, \forall a \in A$ . En este caso decimos que  $m$  es cota inferior de  $A$ .
- si está acotado superior e inferiormente.

**Definición:** Sea  $A \subseteq \mathbb{R}$  tal que  $A$  es no vacío y está acotado superiormente, decimos que un número real  $S$  es supremo de  $A$  si  $S$  satisface las siguientes condiciones:

- $S$  es cota superior de  $A$ .
- Si  $K$  es cota superior de  $A$ , entonces  $S \leq K$ .

En este caso escribimos  $S = \sup(A)$ .

**Definición:** . Sea  $A$  un subconjunto no vacío del conjunto de los números reales, acotado inferiormente, decimos que un número real  $L$  es ínfimo de  $A$  si  $L$  satisface las siguientes condiciones:

- $L$  es cota inferior de  $A$ .
- Si  $K$  es cota inferior de  $A$ , entonces  $K \leq L$ , es decir,  $L$  es la cota inferior más grande de  $A$ .

En este caso escribimos  $M = \inf(A)$

## Lista de ejercicios 8 (LE8)

Demuestre lo siguiente:

1. Sea  $A$  un subconjunto no vacío de  $\mathbb{R}$ .  $A$  está acotado si y solo si  $A$  está acotado superior e inferiormente.

**Demostración:**

$\Rightarrow$ ) ads

$\Leftarrow$ ) asdf

□

2. Sea  $A$  un subconjunto no vacío de  $\mathbb{R}$ , si  $A$  tiene supremo, este es único.

**Demostración:** Supongamos que  $s_1$  y  $s_2$  son supremos de  $A$ . Como  $s_1$  es una cota superior de  $A$  y  $s_2$  es elemento supremo, entonces  $s_2 \leq s_1$ . Similarmente,  $s_1 \leq s_2$ . Por tanto,  $s_1 = s_2$ . □

3. Sea  $A$  un subconjunto no vacío de  $\mathbb{R}$ , si  $A$  tiene ínfimo, este es único.

**Demostración:** Supongamos que  $m_1$  y  $m_2$  son ínfimos de  $A$ . Como  $m_1$  es una cota superior de  $A$  y  $m_2$  es elemento ínfimo, entonces  $m_1 \leq m_2$ . Similarmente,  $m_2 \leq m_1$ . Por tanto,  $m_1 = m_2$ . □

4. Una cota superior  $M$  de un conjunto no vacío  $S$  de  $\mathbb{R}$  es el supremo de  $S$  si y solo si para toda  $\varepsilon > 0$  existe  $s_\varepsilon \in S$  tal que  $M - \varepsilon < s_\varepsilon$ .

**Demostración:** i) Sea  $M$  una cota superior de  $S$  tal que  $\forall \varepsilon > 0, \exists s_\varepsilon$  tal que  $M - \varepsilon < s_\varepsilon$ . Si  $M$  no es el supremo de  $S$ , tendríamos que  $\exists V$  tal que  $s_\infty a \leq V < M$ . Elegimos  $\varepsilon = M - V$ , con lo que  $V < s_\varepsilon$ , lo que contradice nuestra hipótesis. Por tanto,  $M$  es el supremo de  $S$ .

ii) Sea  $M$  el supremo de  $S$  y  $\varepsilon > 0$ . Como  $M < M + \varepsilon$ , entonces  $M - \varepsilon$  no es una cota superior de  $S$ , por lo que  $\exists s_\varepsilon$  tal que  $s_\varepsilon > M - \varepsilon$ . □

## Axioma del supremo

Todo subconjunto no vacío del conjunto de los números reales que sea acotado superiormente tiene supremo.

**Teorema.** El conjunto de los números naturales no está acotado superiormente.

### Demostración:

Supongamos que el conjunto de los números naturales está acotado superiormente. Entonces existe un número real  $M$  tal que  $n \leq M, \forall n \in \mathbb{N}$ . Como el conjunto de los números naturales es no vacío, entonces, por el axioma del supremo,  $\mathbb{N}$  tiene supremo.

Sea  $L := \sup(\mathbb{N})$ . Como  $L - 1$  no es cota superior de  $\mathbb{N}$ , ya que  $L > L - 1$  y  $L$  es la cota superior más pequeña, existe un número natural  $n_0$  tal que  $n_0 > L - 1$ , lo cual implica que  $n_0 + 1 < L$ , pero esto contradice la hipótesis de que  $L$  es supremo de  $\mathbb{N}$ . Por tanto, el conjunto de los números naturales no está acotado superiormente.  $\square$

**Teorema.** Si  $A \subseteq \mathbb{R}, A \neq \emptyset$  y  $A$  está acotado inferiormente, entonces  $A$  tiene ínfimo.

### Demostración:

Sea  $A \subseteq \mathbb{R}, A \neq \emptyset$  y  $A$  está acotado inferiormente. El conjunto  $-A := \{-a : a \in A\}$  está acotado superiormente y, por el axioma del supremo,  $-A$  tiene supremo. Sea  $M := \sup(-A)$ , entonces  $M \geq -a, \forall -a \in -A$ . Notemos que  $-M \leq a, \forall a \in A$ , esto es  $-M$  es el ínfimo de  $A$ .  $\square$

## Lista de Ejercicios

Sea  $\emptyset \neq A \subseteq B \subseteq \mathbb{R}$ .

- a)  $\forall \varepsilon > 0 \exists b \in B$  tal que  $\inf B \leq b < \inf B + \varepsilon$
- b)  $\forall \varepsilon > 0 \exists a \in A$  tal que  $\sup A - \varepsilon < a \leq \sup A$ .

## Propiedad Arquimediana del conjunto de los números reales

Para cada número real  $x$  existe un número natural  $n$  tal que  $x < n$ .

### Demostración:

Supongamos que existe  $x \in \mathbb{R}$  tal que  $n \leq x, \forall n \in \mathbb{N}$ . Notemos que  $x$  es una cota superior de  $\mathbb{N}$ , pero esto contradice el teorema que establece que el conjunto de los números naturales no está acotado superiormente. Por tanto, se satisface la propiedad arquimediana del conjunto de los números reales.  $\square$

## Lista de Ejercicios 9 (LE9)

- a) Si  $S := \left\{ \frac{1}{n} : n \in \mathbb{N} \right\}$ , entonces  $\inf S = 0$ .
- b) Si  $t > 0$ , entonces  $\exists n \in \mathbb{N}$  tal que  $0 < \frac{1}{n} < t$ .
- c) Si  $y > 0$ , entonces  $\exists n \in \mathbb{N}$  tal que  $n - 1 \leq y < n$ .
- d) Sea  $x \in \mathbb{R}$ , demuestre que  $\exists! n \in \mathbb{Z}$  tal que  $n \leq x < n + 1$ .

### Demostración

- a) Sabemos que  $0 < \frac{1}{n} \leq 1, \forall n \in \mathbb{N}$ , por lo que  $S$  está acotado inferiormente por 0; de esto sigue que  $S$  tiene ínfimo. Sea  $w := \inf S$ . Por definición,  $\frac{1}{n} \geq w \geq 0, n \in \mathbb{N}$ . Supongamos que  $w > 0$ . Por la propiedad



arquimediana  $\exists n_0$  tal que  $\frac{1}{w} < n_0$ , de donde sigue que  $w < \frac{1}{n_0}$  con  $\frac{1}{n_0} \in S$ , lo cual es una contradicción. Por tanto,  $w = 0$ .  $\square$

b) Por la propiedad arquimediana  $\exists n$  tal que  $\frac{1}{t} < n$ . Como  $n$  y  $t$  son mayores que 0, sigue que  $0 < \frac{1}{n} < t$ .  $\square$

c) Por la propiedad arquimediana, el conjunto  $E := \{ m \in \mathbb{N} : y < m \}$  es no vacío. Además, por el principio del buen orden,  $\exists n \in E$  tal que  $n \leq m, \forall m \in E$ . Notemos que  $n - 1 < n$ , por lo que  $n - 1 \notin E$ , lo que implica que  $n - 1 \leq y < n$ .  $\square$

d) Definimos el conjunto  $A := \{ n \in \mathbb{Z} : x < n \}$ . Por la propiedad arquimediana  $\exists n_0 \in \mathbb{N}$  tal que  $x < n_0$ , así  $n_0 \in A$ , por lo que  $A \neq \emptyset$ . Sabemos también que  $A$  está acotado inferiormente, de manera que  $A$  tiene elemento mínimo. Sea  $n$  el elemento mínimo de  $A$ . Notemos que  $n - 1 < n$ , de donde sigue que  $n - 1 \leq x < n$ . Luego,  $n - 1 \in \mathbb{Z}$ , al que definimos como  $m = n - 1$ , por lo que  $m \leq x < m + 1$ .

Finalmente, supongamos que  $\exists m, n \in \mathbb{Z}$  tales que  $m \leq x < m + 1$  y  $n \leq x < n + 1$ . Si  $m \neq n$ , sin pérdida de generalidad,  $m > n$ . Por ello,

$$\begin{aligned} n &< m \leq x < n + 1 \\ n &< m < n + 1 \\ 0 &< m - n < 1 \end{aligned}$$

Lo que contradice la cerradura de la suma en  $\mathbb{Z}$ . Por tanto,  $m = n$ , es decir, el número entero que satisface  $n \leq x < n + 1$  es único.  $\square$

## Funciones

**Definición:** Sean  $a$  y  $b$  objetos cualesquiera, definimos la pareja ordenada  $(a, b)$  como sigue:

$$(a, b) := \{ \{ a \}, \{ a, b \} \}$$

Al objeto  $a$  lo llamaremos primer componente de la pareja ordenada  $(a, b)$  y al objeto  $b$  lo llamaremos segundo componente de la pareja ordenada  $(a, b)$ .

**Teorema:**  $(a, b) = (c, d)$  si y solo si  $a = c$  y  $b = d$ .

**Demostración:** Pendiente

## Entorno

**Definición:** Sea  $a, b$  números reales, definimos el intervalo

- abierto, como  $(a, b) := \{ x \in \mathbb{R} \mid a < x < b \}$
- semicerrado-abierto, como  $[a, b) := \{ x \in \mathbb{R} \mid a \leq x < b \}$
- semiabierto-cerrado, como  $(a, b] := \{ x \in \mathbb{R} \mid a < x \leq b \}$
- cerrado, como  $[a, b] := \{ x \in \mathbb{R} \mid a \leq x \leq b \}$ .

**Definición.** Sea  $\ell \in \mathbb{R}$  y  $\varepsilon > 0$ . El vecindario- $\varepsilon$  de  $\ell$  es el conjunto  $V_\varepsilon(\ell) := \{ x \in \mathbb{R} : |x - \ell| < \varepsilon \}$ .

Notemos que por el teorema para eliminar valores absolutos en algunas desigualdades,

$$|x - \ell| < \varepsilon = -\varepsilon < x - \ell < \varepsilon = \ell - \varepsilon < x < \ell + \varepsilon$$

Por lo que el vecindario- $\varepsilon$  de  $\ell$  es equivalente al intervalo abierto:  $(\ell - \varepsilon, \ell + \varepsilon)$ .

## Lista de Ejercicios 5 (LE5)

Sean  $a, b \in \mathbb{R}$ . Demuestre lo siguiente:

- a) Si  $0 \leq a < \varepsilon$  para toda  $\varepsilon > 0$ , entonces  $a = 0$ .

**Demostración:** Supongamos que  $0 < a$ , sigue que  $0 < \frac{a}{2} < a$ . En particular,  $\varepsilon = \frac{a}{2}$ , entonces  $\varepsilon < a$ , pero esto contradice nuestra hipótesis de que  $a < \varepsilon$  para toda  $\varepsilon > 0$ . Por tanto,  $a = 0$ .  $\square$

- b) Si  $a \leq b + \varepsilon$  para toda  $\varepsilon > 0$ , entonces  $a \leq b$ .

**Demostración:** Sean  $a$  y  $b$  números reales tales que  $a \leq b + \varepsilon$ ,  $\forall \varepsilon > 0$ . Supongamos que  $a > b$ . Luego,  $a - b > 0$ . Notemos que  $(a - b) \cdot \frac{1}{2} > 0 \cdot \frac{1}{2}$ , es decir  $\frac{(a-b)}{2} > 0$ . Sea  $\varepsilon = \frac{(a-b)}{2}$ , sigue que  $a = 2\varepsilon + b$ . Además,  $2\varepsilon > \varepsilon$ , de donde obtenemos  $2\varepsilon + b > \varepsilon + b$ . De este modo,  $a > b + \varepsilon$ , pero esto contradice nuestra hipótesis. Por tanto,  $a \leq b$ .  $\square$

- c) Si  $x \in V_\varepsilon(a)$  para toda  $\varepsilon > 0$ , entonces  $x = a$ .

**Demostración:** Si  $x \in V_\varepsilon(a)$  tenemos que  $|x - a| < \varepsilon$ . Además,  $0 \leq |x - a|$ , por definición. Así,  $0 \leq |x - a| < \varepsilon$ . Como esta desigualdad se cumple para toda  $\varepsilon > 0$ , por (p) de LE3, sigue que  $|x - a| = 0$ . De este modo,  $|x - a| = x - a$  con  $x - a = 0$ . Por tanto,  $x = a$ .  $\square$

- d) Sea  $U := \{x : 0 < x < 1\}$ . Si  $a \in U$ , sea  $\varepsilon$  el menor de los números  $a$  y  $1 - a$ . Demuestre que  $V_\varepsilon(a) \subseteq U$ .

**Demostración:**

- i) Si  $a > 1 - a$ , tenemos  $\varepsilon = 1 - a$ . Sea  $y \in V_\varepsilon(a)$ , entonces  $|y - a| < 1 - a$ . De (f) de LE4 sigue que  $a - 1 < y - a < 1 - a$  (\*). Tomando el lado derecho de (\*) obtenemos  $y < 1$ . Luego, de la hipótesis sigue que  $2a > 1$ , o sea  $2a - 1 > 0$ . Del lado izquierdo de la desigualdad (\*), tenemos  $2a - 1 < y$ , por lo que  $0 < y$ .
- ii) Si  $1 - a > a$ , tenemos  $\varepsilon = a$ . Sea  $y \in V_\varepsilon(a)$ , entonces  $|y - a| < a$ . De (f) de LE4 sigue que  $-a < y - a < a$ . Sumando  $a$  en esta desigualdad obtenemos  $0 < y < 2a$ . Luego, de la hipótesis sigue que  $1 > 2a$ , entonces  $0 < y < 1$ .

En cualquier caso,  $0 < y < 1$ , lo que implica que  $V_\varepsilon(a) \subseteq U$ .  $\square$

- e) Demuestre que si  $a \neq b$ , entonces existen  $U_\varepsilon(a)$  y  $V_\varepsilon(b)$  tales que  $U \cap V = \emptyset$ .

**Demostración:** Supongamos que para toda  $U_\varepsilon(a)$  y  $V_\varepsilon(b)$  se cumple que  $U_\varepsilon(a) \cap V_\varepsilon(b) \neq \emptyset$ . Entonces, existe  $x$  tal que  $x \in U_\varepsilon(a)$  y  $x \in V_\varepsilon(b)$ . Como en ambas vecindades tenemos  $\varepsilon > 0$  arbitraria, por (a) de LE5, sigue que  $x = a$  y  $x = b$ , pero esto contradice el supuesto de que  $a \neq b$ . Por tanto, deben existir  $U_\varepsilon(a)$  y  $V_\varepsilon(b)$  tales que  $U \cap V = \emptyset$ .  $\square$

## Sucesiones

**Definición:** Una sucesión es una función

$$\begin{aligned} X : \mathbb{N} &\rightarrow \mathbb{R} \\ n &\mapsto x_n \end{aligned}$$

Llamamos a  $x_n$  el  $n$ -ésimo término. Otras etiquetas para la sucesión son  $(x_n)$ ,  $(x_n : n \in \mathbb{N})$ , que denotan orden y se diferencian del rango de la función  $\{x_n : n \in \mathbb{N}\} \subseteq \mathbb{R}$ .

**Definición:** Una sucesión  $(x_n)$  es convergente si  $\exists \ell \in \mathbb{R}$  tal que para cada  $\varepsilon > 0$  existe un número natural  $n_\varepsilon$  (que depende de  $\varepsilon$ ) de modo que los términos  $x_n$  con  $n \geq n_\varepsilon$  satisfacen que  $|x_n - \ell| < \varepsilon$ .

Decimos que  $(x_n)$  converge a  $\ell \in \mathbb{R}$  y llamamos a  $\ell$  el límite de la sucesión y escribimos  $\lim(x_n) = \ell$ .

**Definición:** Una sucesión es divergente si no es convergente.

**Definición:** Una sucesión  $(x_n)$  está acotada si  $\exists M \in \mathbb{R}^+$  tal que  $|x_n| \leq M, \forall n \in \mathbb{N}$ .

## Lista de Ejercicios 10 (LE10)

Demuestre lo siguiente:

- a) El límite de una sucesión convergente es único.
- b) Toda sucesión convergente está acotada.

### Demostración

- a) Sean  $\ell$  y  $\ell'$  límites de la sucesión  $(x_n)$ . Tenemos que  $\forall \varepsilon > 0$ , existen  $n', n'' \in \mathbb{N}$  tales que  $|x_{n \geq n'} - \ell| < \varepsilon$  y  $|x_{n \geq n''} - \ell'| < \varepsilon$ . Sin pérdida de generalidad, si  $n' < n''$ , los términos  $x_n$  con  $n \geq n'' > n'$  satisfacen que

$$|x_n - \ell| < \varepsilon \quad (1)$$

$$|x_n - \ell'| < \varepsilon \quad (2)$$

Por (c) de LE4, se cumple que  $|x_n - \ell'| = |\ell' - x_n|$  y por esto,

$$|\ell' - x_n| < \varepsilon \quad (3)$$

Tomando (1) y (3), por (d) de LE3, se verifica que

$$|\ell' - x_n| + |x_n - \ell| < 2\varepsilon$$

Y, por la desigualdad del triángulo, tenemos que

$$\begin{aligned} |(\ell' - x_n) + (x_n - \ell)| &\leq |\ell' - x_n| + |x_n - \ell| \\ |\ell' - \ell| &\leq |\ell' - x_n| + |x_n - \ell| \end{aligned}$$

De este modo,  $|\ell' - \ell| < 2\varepsilon$ . Como esta desigualdad se cumple para todo  $\varepsilon > 0$ , en particular se verifica para  $\varepsilon = \varepsilon_0/2$  con  $\varepsilon_0 > 0$  arbitrario pero fijo, así obtenemos que

$$\begin{aligned} |\ell' - \ell| &< 2 \left( \frac{\varepsilon_0}{2} \right) \\ |\ell' - \ell| &< \varepsilon_0 \end{aligned}$$

Finalmente, como  $\varepsilon_0$  es arbitrario, por (a) de LE5, sigue que  $\ell' = \ell$ . Por tanto, el límite de cada sucesión convergente es único.  $\square$

- b) Sea  $(x_n)$  una sucesión convergente. Por definición,  $\forall \varepsilon > 0, \exists n_\varepsilon \in \mathbb{N}$  tal que los términos  $x_n$  con  $n \geq n_\varepsilon$  satisfacen que

$$\begin{aligned} |x_n - \ell| &< \varepsilon \\ |x_n - \ell| + |\ell| &< \varepsilon + |\ell| \end{aligned}$$

Luego, por la desigualdad del triángulo,

$$\begin{aligned} |(x_n - \ell) + \ell| &\leq |x_n - \ell| + |\ell| \\ |x_n| &\leq |x_n - \ell| + |\ell| \end{aligned}$$

Por transitividad,  $|x_n| < \varepsilon + |\ell|$ , lo que implica que  $\{x_{n \geq n_\varepsilon}\}$  está cotado superiormente.

Por otra parte, el conjunto de índices  $n < n_\varepsilon$  está acotado, y por esto,  $\{x_{n < n_\varepsilon}\}$  es finito, por lo que tiene cota superior.

Finalmente, el conjunto  $\{x_{n < n_\varepsilon}\} \cup \{x_{n \geq n_\varepsilon}\}$  está acotado superiormente, y por tanto,  $(x_n)$  está acotada.  $\square$

**Teorema.** Todo conjunto finito no vacío tiene elemento mínimo y elemento máximo, es decir, para todo conjunto finito  $A \neq \emptyset$ ,  $\exists m, M \in A$  tales que  $m \leq a \leq M, \forall a \in A$ .

**Demostración:** Sea  $n \in \mathbb{N}$  y  $A := \{a_1, \dots, a_n\}$  no vacío.

Procedemos por inducción sobre el número de elementos de  $A$ .

- i) Si  $n = 1$ , tenemos  $A := \{a_1\}$ , por lo que  $m = a_1$  y  $M = a_1$  cumplen la condición requerida.
- ii) Supongamos que la proposición se cumple para  $n = k$ .
- iii) Si  $n = k + 1$ , tenemos  $A := \{a_1, \dots, a_k, a_{k+1}\}$ . Luego, por hipótesis de inducción, el conjunto

$$A' := A \setminus \{a_{k+1}\} = \{a_1, \dots, a_k\}$$

tiene elemento mínimo y máximo, es decir,  $\exists m', M' \in A'$  tales que  $\forall a' \in A', m' \leq a' \leq M'$ .

Notemos que para cada  $a \in A$  tenemos  $a = a_{k+1}$  o  $a \in A'$ . Por tricotomía,  $a_{k+1}$  cumple con alguno de los siguientes casos:

- a) Si  $a_{k+1} < m'$ , tenemos que  $m = a_{k+1} < m' \leq a' \leq M' = M$ .
- b) Si  $m' \leq a_{k+1} \leq M'$ , entonces  $m = m' \leq a_{k+1} \leq M' = M$ .
- c) Si  $m' < a_{k+1}$ , tenemos que  $m = m' \leq a' \leq M' < a_{k+1} = M$ .

En cualquier caso  $\exists m, M \in A$  tales que  $m \leq a \leq M, \forall a \in A$ .  $\square$