Manual de Análisis Matemático Real

para Ciencias e Ingenierías





Indice de contenidos

Ρı	efaci	0	3						
	Lice	ncia	3						
1	Teo	Teoría de conjuntos 4							
	1.1	Conjuntos	4						
	1.2	Álgebra de conjuntos	6						
	1.3	Relaciones entre conjuntos	10						
	1.4	Cotas y extremos	13						
	1.5	Funciones	15						
	1.6	Cardinalidad de un conjunto	18						
2	El s	El sistema de los números reales 24							
	2.1	El conjunto de los números naturales $\mathbb N$	24						
	2.2	El conjunto de los números enteros $\mathbb Z$	25						
	2.3	El conjunto de los números racionales $\mathbb Q$	25						
	2.4	El conjunto de los números irracionales	26						
	2.5	El conjunto de los números reales	27						
	2.6	Clasificación de los conjuntos numéricos	44						
3	Тор	Topología de la recta real 45							
	3.1	Intervalos y entornos	45						
	3.2	Clasificación de puntos	48						
	3.3	Conjuntos abiertos y cerrados	52						
4	Sucesiones de números reales 50								
	4.1	Concepto de sucesión	56						
	4.2	Límite de una sucesión	58						
	4.3	Sucesiones monótonas	65						
	4.4	Subsucesiones	68						
	4.5	Sucesiones propiamente divergentes	70						
	4.6	Sucesiones de Cauchy	73						
5	Fun	ciones reales de variable real	75						
	5.1	El concepto de función	75						
		5.1.1 Formas de representar una función	76						
	5.2	Dominio de una función	77						
	5.3	Imagen de una función	78						

5.4	Álgebra de funciones	78
	5.4.1 Función constante	78
	5.4.2 Función identidad	79
5.5	Composición de funciones	81
5.6	Función inversa	82
5.7	Crecimiento de una función	
5.8	Extremos de una función	83
5.9	Concavidad de una función	83
5.10	Funciones periódicas	84
	Funciones polinómicas	85
	5.11.1 Propiedades de las funciones polinómicas	85
5.12	Funciones racionales	86
	5.12.1 Propiedades de las funciones racionales	86
5.13	Funciones potenciales	87
	5.13.1 Propiedades de las funciones potenciales	88
5.14	Funciones exponenciales	
9	5.14.1 Propiedades de las funciones exponenciales	89
5.15	Funciones logarítmicas	89
0.20	5.15.1 Propiedades de las funciones logarítmicas	90
5.16	Funciones trigonométricas	91
0.10	5.16.1 Seno de un ángulo	91
	5.16.2 Función seno	92
	5.16.3 Propiedades de la función seno	92
	5.16.4 Coseno de un ángulo	93
	5.16.5 Función coseno	93
	5.16.6 Propiedades de la función coseno	94
	5.16.7 Tangente de un ángulo	94
	5.16.8 Función tangente	95
	5.16.9 Propiedades de la función tangente	95
	5.16.10 Función arcoseno	96
	5.16.11 Propiedades de la función arcoseno	96
	5.16.12 Función arcocoseno	97
	5.16.13 Propiedades de la función arcoseno	97
	5.16.14 Función arcotangente	
	5.16.15 Propiedades de la función arcotangente	
	5.16.16 Algunas relaciones trigonométricas	
	o.iv.iviingunaa rometones tiigonomotiicas	00
Lími	tes de funciones	100
6.1	El concepto de límite	100
	6.1.1 Aproximación al concepto de límite	
	6.1.2 Límites laterales	
	6.1.3 Límites que no existen (I)	
	6.1.4 Límites que no existen (II)	
	6.1.5 Límites que no existen (III)	

	6.1.6	Límites que no existen (IV)	104			
	6.1.7	Límites en el infinito	105			
6.2	Definición de límite					
6.3	Álgebr	ra de límites	110			
6.4	_	s laterales				
6.5		s infinitos				
6.6		s en el infinito				
6.7	Límite	s de las funciones elementales	117			
6.8	Indete	rminaciones y su resolución	119			
	6.8.1	Tipos de indeterminaciones				
	6.8.2	Resolución de una indeterminación de tipo cociente				
	6.8.3	Resolución de una indeterminación de tipo producto	123			
	6.8.4	Resolución de una indeterminación de tipo potencia	124			
	6.8.5	Resolución de una indeterminación de tipo diferencia	125			
6.9	Asínto	tas de una función	125			
	6.9.1	Asíntotas verticales	126			
	6.9.2	Asíntotas horizontales	126			
	6.9.3	Asíntotas oblicuas	129			
6.10	Contin	nuidad	129			
6.11	Tipos	de discontinuidades	132			
	6.11.1	Discontinuidad evitable	132			
	6.11.2	Discontinuidad de 1ª especie de salto finito	132			
	6.11.3	Discontinuidad de 1ª especie de salto infinito	133			
	6.11.4	Discontinuidad de $2^{\underline{a}}$ especie	134			
6.12	Funcio	ones continuas en intervalos	137			
			139			
Bolzano 1						

Prefacio

¡Bienvenida/os al manual de Análisis Matemático de variable real!

Este libro es una introducción al Análisis Matemático de variable real y cubre los contenidos típicos de un grado en Matemáticas o Ingeniería Matemática.

Este libro se acompaña de una colección de problemas resueltos.

Licencia

Esta obra está bajo una licencia Reconocimiento – No comercial – Compartir bajo la misma licencia 3.0 España de Creative Commons. Para ver una copia de esta licencia, visite https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/es/.

Con esta licencia eres libre de:

- Copiar, distribuir y mostrar este trabajo.
- Realizar modificaciones de este trabajo.

Bajo las siguientes condiciones:

- Reconocimiento. Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciador (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o apoyan el uso que hace de su obra).
- No comercial. No puede utilizar esta obra para fines comerciales.
- Compartir bajo la misma licencia. Si altera o transforma esta obra, o genera una obra derivada, sólo puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.

Al reutilizar o distribuir la obra, tiene que dejar bien claro los términos de la licencia de esta obra.

Estas condiciones pueden no aplicarse si se obtiene el permiso del titular de los derechos de autor.

Nada en esta licencia menoscaba o restringe los derechos morales del autor.

1 Teoría de conjuntos

Los conjuntos son entes matemáticos que se usan habitualmente para modelar situaciones reales en las que aparecen colecciones de objetos de cualquier naturaleza, así como las relaciones entre ellos, y por tanto, aparecen en la mayor parte de los problemas de Ciencia o Ingeniería.

Al mismo tiempo, los conjuntos son una de las estructuras matemáticas más básicas sobre las que se construyen la mayoría de las teorías matemáticas.

En este capítulo se estudia el concepto de *conjunto* y sus principales propiedades y relaciones.

1.1 Conjuntos

Definición 1.1 (Conjunto). Un *conjunto* es a una colección o agrupación bien definida de objetos que puede considerarse en sí misma otro objeto. Para representar un conjunto se indican sus elementos entre llaves y normalmente se utilizarán letras mayúsculas para referirse a ellos.

Ejemplo 1.1. Algunos ejemplos de conjuntos son:

- El conjunto de los días de la semana es $A = \{L, M, X, J, V, S, D\}$.
- El conjunto de los colores básicos es $B = \{\text{rojo, verde, azul}\}.$
- El conjunto de los puntos de un dado $C = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}.$
- El conjunto de los números naturales pares: $D = \{2, 4, 6, ...\}$.

Definición 1.2 (Elementos). Los objetos que componen un conjunto se llaman elementos o miembros del conjunto.

Los elementos de un conjunto pueden ser cualquier cosa (días, colores, personas, etc), pero en este curso nos centraremos los conjuntos numéricos, es decir, los conjuntos cuyos elementos son números, ya que son los que se estudian en el Análisis Matemático.

Existen dos formas de definir un conjunto: por extensión o por comprensión. La definición extensiva consiste en listar de manera explícita todos sus elementos, como por ejemplo $\{1,2,3\}$, mientras que la intensiva o por comprensión, consiste en dar una propiedad que cumplen los elementos del conjunto y solo ellos, como por ejemplo el conjunto de los números naturales menores que 4. En este último caso se suele utilizar la notación $\{x: P(x)\}$, donde P(x) es la propiedad que cumple x.

Mientras que las definiciones por extensión no presentan problemas, hay que tener cuidado con las definiciones por comprensión, pues no todas las propiedades definen conjuntos válidos, tal y como demostró Bertrand Russell con su famosa paradoja del barbero.

Definición 1.3 (Pertenencia). Si a es un elemento de un conjunto A, se dice que a pertenence a A y se denota $a \in A$. Por el contrario, si a no es un elemento del conjunto A, se dice que no pertenece a A y se denota $a \notin A$.

Ejemplo 1.2. Si A es el conjunto de los números naturales pares, $2 \in A$, pero $1 \notin A$.

Definición 1.4 (Igualdad). Se dice que dos conjuntos A y B son iguales, y se denota A = B, si tienen exactamente los mismos elementos. En caso contrario se escribe $A \neq B$.

Conviene remarcar que en un conjunto no puede haber elementos repetidos y tampoco importa el orden en que se listan los elementos.

Ejemplo 1.3. $\{1,2,3\} = \{3,1,2\}.$

Proposición 1.1. La igualdad de conjuntos es una relación de equivalencia, es decir, satisface las propiedades:

- 1. Reflexiva: A = A.
- 2. Simétrica: $Si\ A = B\ entonces\ B = A$.
- 3. Transitiva: $A = B \ y \ B = C$, entonces A = C.

Definición 1.5 (Subconjunto). Se dice que un conjunto A es un *subconjunto* o está *incluído* en otro conjunto B, y se denota $A \subseteq B$, si todos los elementos de A pertenecen a B, es decir,

$$\forall x \in A, x \in B$$

Cuando $A \subseteq B$ pero $A \neq B$ se dice que A está estríctamente incluido en B o que A es un subconjunto propio de B y se escribe $A \subseteq B$.

Ejemplo 1.4. $\{1,2,3\} \subseteq \{3,1,2\}$ y $\{1,3\} \subseteq \{3,1,2\}$.

Proposición 1.2. La inclusión de conjuntos es una relación de orden parcial, es decir, satisface las propiedades:

- 1. Reflexiva: $A \subseteq A$.
- 2. Antisimétrica: Si $A \subseteq B$ y $B \subseteq A$, entonces A = B.
- 3. Transitiva: $A \subseteq B$ y $B \subseteq C$, entonces $A \subseteq C$.

Definición 1.6 (Conjunto vacío). El conjunto que no tiene ningún elemento se llama conjunto vacío y se denota \emptyset .

1.2 Álgebra de conjuntos

A continuación se definen las principales operaciones sobre conjuntos y sus propiedades.

Definición 1.7 (Unión). Dados dos conjuntos A y B, se llama unión de A y B, y se denota $A \cup B$, al conjunto de todos los elementos que pertenecen al menos a uno de los conjuntos A y B.

$$A \cup B = \{x : x \in A \text{ o } x \in B\}.$$

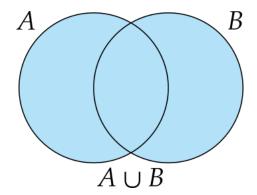


Figura 1.1: Unión de conjuntos

Definición 1.8 (Intersección). Dados dos conjuntos A y B, se llama *intersección* de A y B, y se denota $A \cap B$, al conjunto de todos los elementos comunes a A y B.

$$A \cap B = \{x : x \in A \ y \ x \in B\}.$$



Figura 1.2: Intersección de conjuntos

Definición 1.9 (Complemento). Dado un conjunto $A \subset \Omega$, se llama *complemento* de A con respecto a Ω , y se denota \overline{A} , al conjunto de todos los elementos de Ω que no pertenecen a A.

$$\overline{A} = \{ x \in \Omega : x \notin A \}.$$

Definición 1.10 (Diferencia). Dados dos conjuntos A y B, se llama diferencia de A y B, y se denota A - B, al conjunto formado por los elementos de A que no pertenecen a B, es decir,

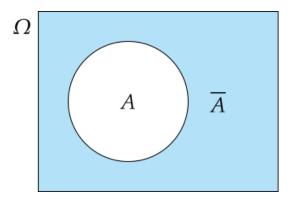


Figura 1.3: Complemento de un conjunto

$$A - B = \{x : x \in A \ y \ x \notin B\}.$$



Figura 1.4: Diferencia de conjuntos

Definición 1.11 (Diferencia simétrica). Dados dos conjuntos A y B, se llama diferencia simétrica de A y B, y se denota $A \triangle B$, al conjunto formado por los elementos que pertenecen a $A \circ B$, pero no a ambos a la vez, es decir,

$$A\triangle B = \{x \,:\, x\in A-B \text{ o } x\in B-A\}$$

$$= (A-B)\cup (B-A) = (A\cup B)-(A\cap B)$$

Ejemplo 1.5. Dado el conjunto de los números que contiene un dado, $\Omega = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ y sus subconjuntos $A = \{2, 4, 6\}$ y $B = \{1, 2, 3, 4\}$,

• La unión de A y B es $A \cup B = \{1, 2, 3, 4, 6\}.$

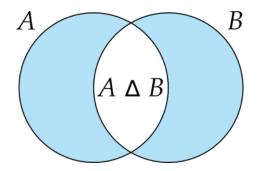


Figura 1.5: Diferencia simétrica de conjuntos

- La intersección de A y B es $A \cap B = \{2, 4\}$.
- El contrario de A con respecto a Ω es $\overline{A} = \{1, 3, 5\}$.
- La diferencia de A y B es $A B = \{6\}$, y la diferencia de B y A es $B A = \{1, 3\}$.
- La diferencia simétrica de A y B es $A \triangle B = \{1, 3, 6\}$.

Proposición 1.3. Dado un conjunto universo Ω y los conjuntos $A, B, C \subseteq \Omega$, se cumplen las siguientes propiedades:

- 1. Idempotencia: $A \cup A = A$ y $A \cap A = A$.
- 2. Conmutativa: $A \cup B = B \cup A$ y $A \cap B = B \cap A$.
- 3. Asociativa: $(A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C)$ y $(A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C)$.
- 4. Distributiva: $(A \cup B) \cap C = (A \cap C) \cup (B \cap C)$ $y (A \cap B) \cup C = (A \cup C) \cap (B \cup C)$.
- 5. Elemento neutro: $A \cup \emptyset = A$ y $A \cap \Omega = A$.
- 6. Elemento absorvente: $A \cup \Omega = \Omega$ y $A \cap \emptyset = \emptyset$.
- 7. Elemento simétrico complementario: $A \cup \overline{A} = E$ y $A \cap \overline{A} = \emptyset$.
- 8. Doble complemento: $\overline{A} = A$.
- 9. Leyes de Morgan: $\overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B}$ y $\overline{A \cap B} = \overline{A} \cup \overline{B}$.
- 10. $A \cap B \subseteq A \cup B$.
- 11. $A B = A \cap \overline{B}$.
- 12. $A B \subseteq A \ y \ B A \subseteq B$.
- 13. $A \triangle B = (A \cup B) (A \cap B)$.
- 14. $\overline{\Omega} = \emptyset \ y \ \overline{\emptyset} = \Omega$.

Definición 1.12 (Conjuntos disjuntos). Dados dos conjuntos A y B, se dice que son disjuntos si no tienen ningún elemento en común, es decir, $A \cap B = \emptyset$.

Definición 1.13 (Conjunto potencia). Dado un conjunto A, se llama *conjunto potencia* o *conjunto de las partes* de A, y se denota $\mathcal{P}(A)$, al conjunto de todos los subconjuntos de A, es decir,

$$\mathcal{P}(A) = \{X : X \subseteq A\}$$

Ejemplo 1.6. El conjunto potencia del conjunto $A = \{1, 2, 3\}$ es

$$\mathcal{P}(A) = \{\emptyset, \{1\}, \{2\}, \{3\}, \{1, 2\}, \{1, 3\}, \{2, 3\}, \{1, 2, 3\}\}\$$

1.3 Relaciones entre conjuntos

Definición 1.14 (Par ordenado). Dados dos elementos a y b se define el par ordenado (a,b) como

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

De manera más general, se define una n-tupla ordenada como

$$(a_1,a_2,\dots,a_n)=((a_1,a_2,\dots,a_{n-1}),a_n)$$

De forma mas informal, decimos que (a, b) es un par ordenado si el primer elemento (a) se distingue del segundo elemento (b). Por eso, se tiene que $(a, b) \neq (b, a)$, mientras que para conjuntos $\{a, b\} = \{b, a\}$.

Definición 1.15 (Producto cartesiano). Dados dos conjuntos A y B, se llama producto cartesiano de A y B, y se denota $A \times B$, al conjunto de los pares ordenados

$$A \times B = \{(a, b) : a \in A \lor b \in B\}$$

De manera más general, si se tienen n conjuntos $A_1,A_2,\dots,A_n,$ el producto cartesiano generalizado es

$$A_1 \times A_2 \times ... \times A_n = \{(a_1, ..., a_n) : a_i \in A_i \ \forall i = 1, ... n\}$$

Definición 1.16 (Relación binaria). Dados dos conjuntos A y B, se dice que R es una relación binaria sobre A y B si es un subconjunto del producto cartesiano de A y B, es decir,

$$R \subseteq A \times B$$

Si A y B son el mismo conjunto, se dice que R es una relación binaria homogénea.

Cuando un par ordenado pertenece a una relación, $(a,b) \in R$, también se suele escribir aRb.

Dependiendo de las propiedades que cumpla una relación tenemos los siguientes tipos de relaciones:

- Reflexiva: $\forall a \in A, (a, a) \in R$
- Irreflexiva: $\forall a \in A, (a, a) \notin R$.
- Simétrica: $\forall a, b \in A$, si $(a, b) \in R$, entonces $(b, a) \in R$.
- Asimétrica: $\forall a, b \in A$, si $(a, b) \in R$, entonces $(b, a) \notin R$.
- Antisimétrica: $\forall a, b \in A$, si $(a, b) \in R$ y $(b, a) \in R$, entonces a = b.
- Transitiva: $\forall a, b, c \in A$, si $(a, b) \in R$ y $(b, c) \in R$, entonces $(a, c) \in R$.
- Total: $\forall a, b \in A, (a, b) \in R \text{ o } (b, a) \in R.$

Definición 1.17 (Relación de equivalencia). Dado un conjunto A y una relación homogénea $R \subseteq A \times A$, se dice que R es una relación de equivalencia, y se denota (A, \sim) , si es que cumple que R es reflexiva, simétrica y transitiva, es decir, si cumple las propiedades

- Reflexiva: $\forall a \in A, a \sim a$.
- Simétrica: $\forall a, b \in A$, si $a \sim b$ entonces $b \sim a$.
- Transitiva: $\forall a, b, c \in A$, si $a \sim b$ y $b \sim c$, entonces $a \sim c$.

Ejemplo 1.7. Ya hemos visto que la relación de igualdad matemática entre los elementos de un conjunto es una relación de equivalencia.

Definición 1.18 (Relación de orden). Dado un conjunto A y una relación homogénea $\preceq \subseteq A \times A$, se dice que \preceq es una relación de orden, si es una relación reflexiva, antisimétrica y transitiva, es decir, si cumple las propiedades

• Reflexiva: $\forall a \in A, a \leq a$.

- Antisimétrica: $\forall a, b \in A$, si $a \leq b$ y $b \leq a$, entonces a = b.
- Transitiva: $\forall a, b, c \in A$, si $a \leq b$ y $b \leq c$, entonces $a \leq c$.

Definición 1.19 (Relación de orden parcial). Dado un conjunto A y una relación homogénea $\preceq \subseteq A \times A$, se dice que \preceq es una relación de orden parcial, si es una relación de orden y al menos dos elementos de A están relacionados mediante \preceq , es decir,

$$\exists x, y \in A, \ x \leq y \text{ o } y \leq x.$$

Al conjunto A con la relación de orden parcial \leq se le llama conjunto parcialmente ordenado, y se denota (A, \leq) .

Ejemplo 1.8. El conjunto potencia de un conjunto A con la relación de inclusión es un conjunto parcialmente ordenado $(\mathcal{P}(A),\subseteq)$.

Definición 1.20 (Relación de orden total). Dado un conjunto A y una relación homogénea $\preceq \subseteq A \times A$, se dice que \preceq es una relación de orden total, si es una relación de orden y todos los elementos de A se relacionan entre sí mediante \preceq , es decir,

$$\forall x, y \in A, \ x \leq y \text{ o } y \leq x.$$

Al conjunto A con la relación de orden total \leq se le llama *conjunto totalmente ordenado*, y se denota (A, \leq) .

Ejemplo 1.9. La relación de orden de los números naturales (\mathbb{N}, \leq) es un orden totalmente ordenado. Sin embargo, la relación de inclusión en el conjunto potencia de un conjunto A $(\mathcal{P}(A), \subseteq)$ no es un orden parcialmente ordenado, ya que dados dos elementos $a \neq b$ de A, se cumple que $\{a\} \subsetneq \{b\}$ y $\{b\} \subsetneq \{a\}$.

1.4 Cotas y extremos

Definición 1.21 (Cota superior). Dado un subconjunto con una relación de orden parcial (A, \preceq) y un subconjunto $B \subseteq A$, se dice que un elemento $c \in A$ es una *cota superior* de B, si todos los elementos de B son menores o iguales a c según la relación de orden, es decir,

$$\forall x \in B, x \leq c.$$

Definición 1.22 (Cota inferior). Dado un subconjunto con una relación de orden parcial (A, \preceq) y un subconjunto $B \subseteq A$, se dice que un elemento $c \in A$ es una *cota inferior* de B, si todos los elementos de B son mayores o iguales a c según la relación de orden, es decir,

$$\forall x \in B, c \leq x.$$

Definición 1.23 (Máximo). Dado un conjunto con una relación de orden parcial (A, \preceq) , se dice que un elemento $m \in A$ es un máximo de A, si cualquier otro elemento de A es mayor o igual que él según la relación de orden, es decir,

$$\forall x \in A, x \prec m.$$

Definición 1.24 (Mínimo). Dado un conjunto con una relación de orden parcial (A, \preceq) , se dice que un elemento $m \in A$ es un *mínimo* de A, si y cualquier otro elemento de A es menor o igual que él según la relación de orden, es decir,

$$\forall x \in A, m \leq x.$$

Teorema 1.1 (Unicidad de los extremos). Dado un conjunto con una relación de orden parcial (A, \preceq) , si existe el máximo de A entonces es único. Lo mismo es cierto para el mínimo.

i Demostración

Demostración. Supongamos que el conjunto A tienen dos máximos $m_1 \neq m_2$. Puesto que m_1 es un máximo de A, se cumple que $\forall x \in A, x \leq m_1$. y, en particular, $m_2 \leq m_1$. Del mismo modo, como m_2 es un máximo de A, se cumple que $\forall x \in A, x \leq m_2$. y, en particular, $m_1 \leq m_2$.

Así pues, se tiene que

$$m_2 \leq m_1 \text{ y } m_1 \leq m_2,$$

pero como \leq es un orden parcial, por la propiedad antisimétrica se concluye que $m_1=m_2$, por lo que el máximo es único.

De manera análoga se puede probar que el mínimo es único.

Dado que el máximo y mínimo de un conjunto, cuando existen, son únicos, es común referirse a ellos como max y min respectivamente. Obsérvese, no obstante, que un conjunto puede no tener máximo o mínimo.

Definición 1.25 (Supremo). Dado un subconjunto con una relación de orden parcial (A, \preceq) y un subconjunto $B \subseteq A$, se llama *supremo* de B y se denota $\sup(B)$ a la menor de las cotas superiores de B.

Definición 1.26 (Ínfimo). Dado un subconjunto con una relación de orden parcial (A, \preceq) y un subconjunto $B \subseteq A$, se llama *ínfimo* de B y se denota $\inf(B)$ a la mayor de las cotas inferiores de B.

Obsérvese que un conjunto puede no tener supremo o ínfimo.

Ejemplo 1.10. Si se toma el conjunto de los números naturales con la relación de orden total (\mathbb{N}, \leq) , para el conjunto $B = \{1, 2, 3\} \subseteq \mathbb{N}$ se tiene que cualquier $x \in \mathbb{N}$ tal que $3 \leq x$ es una cota superior de B, por tanto 3 es el supremo de B, y además es un máximo puesto que $3 \in B$.

Por otro lado, si se considera el conjunto de los números reales con la relación de orden total (\mathbb{R}, \leq) , para el intervalo (0,1) se tiene que cualquier $x \in \mathbb{R}$ tal que $x \leq 0$ es una cota inferior y $x \in \mathbb{R}$ tal que $1 \leq x$ es una cota superior, de modo que 0 es el ínfimo y 1 el supremo. Sin embargo, este conjunto no tiene mínimo ni tampoco máximo puesto que $0 \notin (0,1)$ y $1 \notin (0,1)$.

Finalmente, si se considera el conjunto de los números enteros con la relación de orden total (\mathbb{Z}, \leq) , para el conjunto $B = \{x \in \mathbb{Z} : x \text{ es par}\}$, no existen cotas superiores ni inferiores, y por tanto tampoco tiene supremo, ínfimo, máximo ni mínimo.

1.5 Funciones

El concepto de función es uno de los más importantes en el Análisis Matemático, ya que muchos de los fenómenos naturales en los que una magnitud depende de otra se modelizan mediante funciones.

Definición 1.27 (Función). Se dice que una relación binaria $f \subseteq A \times B$, con A y B conjuntos no vacios, es una función o aplicación, y se denota $f: A \to B$, si f no contiene dos pares ordenados distintos con la misma primera componente, es decir,

$$\forall a \in A, \forall b_1, b_2 \in B, \text{ si } (a, b_1) \in f \text{ y } (a, b_2) \in f, \text{ entonces } b_1 = b_2.$$

Es habitual representar los pares de una función con la notación y = f(x) donde x es la primera componente del par e y la segunda.

Ejemplo 1.11. La relación binaria $f = \{(1, a), (2, c), (3, c), (4, b)\}$ es una función, pero la relación $g = \{(1, a), (2, c), (3, c), (2, b)\}$ no lo es porque existen dos pares cuya primera componente es 2. Del mismo modo la función raíz cuadrada $y = f(x) = \sqrt{x}$ no es una función en el conjunto de los números reales, ya que, por ejemplo $\sqrt{1} = \pm 1$.



Figura 1.6: Ejemplo de función

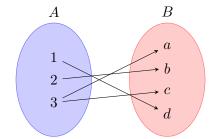


Figura 1.7: Ejemplo de no función

Definición 1.28 (Dominio). Dada una función $f: A \to B$, se llama dominio de f, y se denota Dom(f) al conjunto de las primeras componentes de los pares de f, es decir,

$$Dom(f) = \{a \in A : \exists b \in B, (a, b) \in f\}$$

Definición 1.29 (Imagen). Dada una función $f: A \to B$, se llama *imagen* de f, y se denota Im(f) al conjunto de las segundas componentes de los pares de f, es decir,

$$Im(f) = \{b \in B : \exists a \in A, (a, b) \in f\}$$

Definición 1.30 (Función inyectiva). Dada una función $f: A \to B$, se dice que f es inyectiva si no existen dos elementos de A con la misma imagen, es decir,

$$\forall a_1, a_2 \in A$$
, si $f(a_1) = f(a_2)$, entonces $a_1 = a_2$.

Definición 1.31 (Función sobreyectiva). Dada una función $f:A\to B$, se dice que f es sobreyectiva si todo elemento de B tiene una preimagen (está relacionado con algún elemento de A mediante f), es decir,

$$\forall b \in B, \exists a \in A, f(a) = b.$$

Definición 1.32 (Función biyectiva). Dada una función $f: A \to B$, se dice que f es biyectiva, si f es, a la vez, inyectiva y sobreyectiva.

Definición 1.33 (Función identidad). Dado un conjunto A, se llama función identidad de A, y se denota $\mathrm{id}_A:A\to A$, a la función que empareja cada elemento de A consigo mismo, es decir,

$$\operatorname{id}_A(a) = a, \forall a \in A.$$



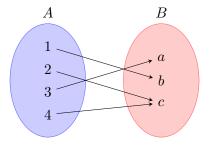


Figura 1.8: Función inyectiva y no sobreyec-Figura 1.9: Función sobreyectiva y no inyectiva tiva



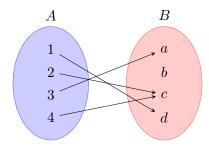


Figura 1.10: Función biyectiva

Figura 1.11: Función no inyectiva y no sobreyectiva

Definición 1.34 (Función inversa). Dada una función $f:A\to B$, se llama función inversa de f, y se denota $f^{-1}:B\to A$, a la función que resulta de revertir el orden de los pares de f, es decir,

$$f^{-1} = \{(b,a): (a,b) \in f\}.$$

Obsérvese que para que exista la función inversa de f, f debe ser inyectiva.

En muchas ocasiones, el valor de salida de una función se puede utilizar como la entrada de otra función, concatenando la aplicación de las dos funciones.

Definición 1.35 (Composición de funciones). Dadas dos funciones $f: A \to B \ y \ g: C \to D$, tales que $\operatorname{Im}(f) \subseteq \operatorname{Dom}(g)$, se llama *composición* de f con g, y se denota $g \circ f: A \to D$, a la funcion que a cada elemento del dominio de A le asocia el elemento que resulta de aplicar g a la imagen de a mediante f, es decir,

$$g \circ f(a) = g(f(a)), \forall a \in A.$$

Proposición 1.4. Dada una función $f: A \to B$, si existe \$^{-1}, entonces $f \circ f^{-1} = \operatorname{id}_A$ $y f^{-1} \circ f = \operatorname{id}_B$.

1.6 Cardinalidad de un conjunto

Definición 1.36 (Cardinal). Dado un conjunto A, se llama *cardinal* de A, y se denota |A|, al número de elementos de A.

De manera informal, se puede decir Que el cardinal de un conjunto es su tamaño.

Ejemplo 1.12. El cardinal del conjunto $A = \{a, b, c\}$ es |A| = 3.

Proposición 1.5. El cardinal del conjunto potencia de un conjunto A es $|\mathcal{P}(A)| = 2^{|A|}$.

i Demostración

Demostración. Se puede dar una prueba mediante coeficientes binomiales. Si A tiene n elementos, es decir, $|\mathbf{A}|=n$, el número de subconjuntos distintos con k elementos es igual al número combinatorio

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}.$$

Como un subconjunto de A puede tener desde 0 hasta n elementos, en total, el número de posibles subconjuntos de A será

$$|\mathcal{P}(A)| = \binom{n}{0} + \binom{n}{1} + \dots + \binom{n}{n} = \sum_{k=0}^{n} \binom{n}{k},$$

y según el teorema del binomio de Newton se tiene que

$$\sum_{k=0}^{n} \binom{n}{k} = 2^n = 2^{|A|}.$$

Definición 1.37 (Conjuntos equipotentes). Se dice que dos conjuntos A y B son equipotentes, y se denota $A \approx B$, si tienen la misma cantidad de elementos, es decir, si |A| = |B|.

Proposición 1.6. Dos conjuntos A y B son equipotentes si y solo si cada elemento de A puede emparejarse con uno de B, de manera que todos los elementos de B sean pareja de uno de A y solo de uno, es decir, existe una aplicación biyectiva $f: A \to B$.

Proposición 1.7. La relación de equipotencia es una relación de equivalencia, es decir, satisface las siguientes propiedades:

- Reflexiva: $A \approx A$ para todo conjunto A.
- Simétrica: $Si\ A \approx B$, entonces $B \approx A$, para cualesquiera conjuntos $A\ y\ B$.
- Transitiva: $Si \ A \approx B \ y \ B \approx C$, entonces $A \approx C$ para cualesquiera conjuntos $A, B \ y \ C$.

De igual modo se puede definir una relación que capture la noción de que un conjunto es de menor tamaño que otro.

Definición 1.38 (Conjunto minuspotente). Dados dos conjuntos A y B, se dice que A es minuspotente a B, y se denota $A \leq B$, si el cardinal de A es menor o igual que el de B, es decir, si $|A| \leq |B|$.

Proposición 1.8. El conjunto A es minuspotente al conjunto B si y solo si existe una aplicación inyectiva $f: A \to B$.

Proposición 1.9. La relación de minuspotencia es una relación de orden, es decir, satisface las siquientes propiedades:

- Reflexiva: $A \leq A$ para todo conjunto A.
- Simétrica: Si $A \leq B$ y $B \leq A$, entonces $A \approx B$, para cualesquiera conjuntos A y B.
- Transitiva: Si A ≤ B y B ≤ C, entonces A ≤ C para cualesquiera conjuntos A, B y C.

Definición 1.39 (Conjunto finito). Se dice que un conjunto A es finito si es que existe un $n \in \mathbb{N}$ tal que $|A| = |\{1, 2, 3, ..., n\}|$. Cuando esto ocurre, el cardinal de A es |A| = n.

Definición 1.40 (Conjunto infinito). Se dice que un conjunto A es *infinito* si no es finito. En tal caso su cardinal se denota $|A| = \infty$.

Hay que dejar claro que el símbolo ∞ es una notación de conveniencia que no es ningún número.

Ejemplo 1.13. El conjunto $A = \{a, b, c\}$ es finito ya que puede definirse una aplicación biyectiva $f: A \to \{1, 2, 3\}$ con los pares $\{(1, a), (2, b), (3, c)\}$, y por tanto, |A| = 3.

Por otro lado, el conjunto de los números naturales $\mathbb N$ es infinito, ya que no puede ponerse en correspondencia biyectiva con ningún conjunto $\{1,2,\ldots,n\}$ para ningún $n\in\mathbb N$, y por tanto, $|\mathbb N|=\infty$.

Cabe preguntarse si dos conjuntos infinitos son siempre del mismo tamaño. Para responder a la pregunta basta con aplicar la Proposición 1.6.

Ejemplo 1.14. El conjunto de los números naturales pares P es infinito y también lo es el conjunto de los números naturales \mathbb{N} . Además ambos son equipotentes pues se puede definir una aplicación biyectiva $f(n) = 2n \ \forall n \in \mathbb{N}$, de manera que $\mathbb{N} \approx P$.

Sin embargo, como se verá más adelante, el conjunto de los números naturales $\mathbb N$ no es equipotente al conjunto de los números reales $\mathbb R$, sino minuspotente. Por tanto, existen conjuntos infinitos de distintos tamaños. Para demostrarlo se necesita introducir un nuevo concepto.

Definición 1.41 (Conjunto numerable). Se dice que un conjunto A es numerable si tiene el mismo cardinal que el conjunto de los números naturales \mathbb{N} .

Corolario 1.1. Un conjunto A es numerable si existe una aplicación biyectiva $f: \mathbb{N} \to A$.

En otras palabras, un conjunto es infinito numerable si tiene correspondencia uno a uno con el conjunto de los números naturales \mathbb{N} .

La prueba de este resultado es inmediata aplicando la Proposición 1.6.

Ejemplo 1.15. En el ejemplo anterior hemos visto que el conjunto de los números pares es equipotente al conjunto de los números naturales, y por consiguiente, es numerable.

Del mismo modo se puede probar que el conjunto de los números enteros $\mathbb Z$ también es numerable, pues se puede definir una aplicación biyectiva $f:\mathbb N\to\mathbb Z$ de la siguiente manera

$$f(n) = \begin{cases} (n-1)/2 & \text{si } n \in \mathbb{N} \text{ es impar,} \\ -n/2 & \text{si } n \in \mathbb{N} \text{ es par.} \end{cases}$$

Sin embargo, existen conjuntos infinitos que no son numerables, como por ejemplo el conjunto de los números reales \mathbb{R} .

David Hilbert, propuso una interesante paradoja para probar este hecho, conocida como la paradoja del hotel infinito

Georg Cantor dio una prueba formal de esto mediante el siguiente teorema.

Teorema 1.2 (Cantor). El conjunto potencia de cualquier conjunto A tiene un cardinal estrictamente mayor que el cardinal de A, es decir, $|A| < |\mathcal{P}(A)|$.

i Demostración

Demostración. Basta con demostrar que no existe una aplicación $f:A\to \mathcal{P}(A)$ sobreyectiva, y para ello basta con encontrar un subconjunto B de A que no sea la imagen mediante f de ningún elemento de A.

Tomando el siguiente subconjunto de A

$$B = \{x \in A : x \notin f(x)\},\$$

es decir, el conjunto de los elementos de A que no están contenidos en el subconjunto de A que le corresponde mediante f, se puede probar por reducción al absurdo que B no puede ser la imagen mediante f de ningún elemento de A.

Sunpóngase que que existe $a \in A$ tal que B = f(a). Como B es un subconjunto de A, pueden darse dos casos:

• Si $a \in B$, entonces por la definición de B se tiene que $a \notin f(a) = B$, lo cual es contradictorio.

• Si $a \notin B$, entonces por la definición de B se tiene que $a \in f(a) = B$, que también es contradictorio.

Así pues, en ambos casos se llega a una contradicción y, por tanto, se concluye que no existe a = f(B), por lo que f no es sobreyectiva y $|A| < |\mathcal{P}(A)| = 2^{|A|}$.

Teorema 1.3 (Cardinalidad del continuo). El conjunto de los números reales \mathbb{R} tiene un cardinal igual al del conjunto potencia del conjunto de los números naturales $\mathcal{P}(\mathbb{N})$, es decir, $|\mathbb{R}| = 2^{|\mathbb{N}|}$.

i Demostración

Demostración. Daremos una demostración partiendo del hecho de que cada número real tiene una expansión decimal infinita de la forma e.d donde e es la parte entera y d la decimal infinita (por ejemplo, 3/2 se puede representar por la expansión decimal infinita 1.5000...).

El número de dígitos en la parte decimal es numerable ya que pueden ponerse fácilmente en correspondencia biyectiva con \mathbb{N} y, por tanto, cualquier número real tendrá $|\mathbb{N}|$ dígitos en su parte decimal, lo que nos da, al ser nuestro sistema de numeración en base 10, un total de $10^{|\mathbb{N}|}$ posibles combinaciones en la parte decimal. En cuanto a la parte entera, ya se ha visto que el conjunto de los números enteros es equipotente al de los números naturales, por lo que $|\mathbb{Z}| = |\mathbb{N}|$.

Así pues, el número total de expansiones decimales infinitas es $|\mathbb{N}|10^{|\mathbb{N}|}$, y como todo número real tienen una expansión decimal infinita, se tiene

$$|\mathbb{R}| \le |\mathbb{N}|10^{|\mathbb{N}|}.$$

Por otro lado, aplicando el Teorema 1.2, $|\mathbb{N}| \leq 2^{|\mathbb{N}|}$, por lo que finalmente se tiene $|\mathbb{R}| \leq |\mathbb{N}|10^{|\mathbb{N}|} \leq 2^{|\mathbb{N}|}10^{|\mathbb{N}|} \leq 2^{|\mathbb{N}|}(2^4)^{|\mathbb{N}|} = 2^{|\mathbb{N}|+4|\mathbb{N}|} = 2^{|\mathbb{N}|}$, ya que por aritmética de las cardinalidades se tiene que $|\mathbb{N}| + 4|\mathbb{N}| = |\mathbb{N}|$.

Para probar el otro sentido de la desigualdad, basta tomar el conjunto de las fracciones decimales de la forma $0.d_1d_2d_3\dots$ donde $d_i\in\{0,1\}$ (por ejemplo $0.101000\dots$) que claramente es un subconjunto de \mathbb{R} . Puesto que cada número de este conjunto tiene infinitos dígitos decimales, de nuevo, se puede poner en correspondencia biyectiva cada dígito con un número natural, y como para cada posición hay dos posibles dígitos (0 y 1), el número total de números en este conjunto es $2^{|\mathbb{N}|}$, por lo que se tiene que $2^{|\mathbb{N}|} \leq |\mathbb{R}|$.

Âsí pues, como $|\mathbb{R}| \leq 2^{|\mathbb{N}|}$ y $2^{|\mathbb{N}|} \leq |\mathbb{R}|$, se concluye que $|\mathbb{R}| = 2^{|\mathbb{N}|}$.

Tomando iterativamente el conjunto potencia de un conjunto infinito y aplicando el teorema de Cantor, obtenemos una jerarquía infinita de cardinales infinitos, cada uno estrictamente mayor que el anterior.

2 El sistema de los números reales

En este capítulo se estudia el conjunto de los números reales \mathbb{R} ya que el Análisis Matemático estudia conceptos y construcciones realizadas a partir de este conjunto de números y sus propiedades.

Antes de presentar el conjunto de los números reales se presentan otros subconjuntos suyos más elementales que suelen introducirse antes. Iremos ampliando sucesivamente estos conjuntos para dotarlos de nuevas propiedades hasta llegar al conjunto de los números reales.

2.1 El conjunto de los números naturales N

El primer conjunto de números que tradicionalmente suele estudiarse en el colegio son los números $naturales \mathbb{N}$, ya que sirven para contar.

En los números naturales se define una relación de orden $< (1 < 2 < 3 < \cdots)$, y dos operaciones binarias, la suma (+) y el producto (\cdot) , con una serie de propiedades que dotan al conjunto de una estructura de semianillo unitario conmutativo bien ordenado:

- a. Propiedad de cierre de la suma: $a + b \in \mathbb{N} \ \forall a, b \in \mathbb{N}$.
- b. Propiedad asociativa de la suma: $(a+b)+c=a+(b+c) \ \forall a,b,c \in \mathbb{N}$.
- c. Propiedad commutativa de la suma: $a+b=b+a \ \forall a,b \in \mathbb{N}$. d.Propiedad de cierre del producto: $a \cdot b \in \mathbb{N} \ \forall a,b \in \mathbb{N}$.
- d. Propiedad asociativa del producto: $(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c) \ \forall a, b, c \in \mathbb{N}$.
- e. Propiedad conmutativa del producto: $a \cdot b = b \cdot a \ \forall a, b \in \mathbb{N}$.
- f. Elemento neutro del producto: $1 \cdot a = a \ \forall a \in \mathbb{N}$.
- g. Propiedad distributiva del producto sobre la suma: $a \cdot (b+c) = (a \cdot b) + (a \cdot c) \ \forall a,b,c \in \mathbb{N}$

En el conjunto de los números naturales todo número tiene un posterior, pero no un anterior.

2.2 El conjunto de los números enteros Z

Los números naturales no tienen simétrico (opuesto) para la suma, de manera que no puede definirse la resta. Para ello es necesario extender el conjunto de los naturales con los números negativos (-1, -2, -3, ...), y el cero (0).

Extendiendo el orden y las operaciones de los naturales a estos números se obtiene el conjunto de los números $enteros \mathbb{Z}$ con las siguientes propiedades que lo dotan de estructura de anillo conmutativo unitario y totalmente ordenado:

- a. Propiedad de cierre de la suma: $a + b \in \mathbb{Z} \ \forall a, b \in \mathbb{Z}$.
- b. Propiedad asociativa de la suma: $(a+b)+c=a+(b+c) \ \forall a,b,c \in \mathbb{Z}$.
- c. Propiedad conmutativa de la suma: $a + b = b + a \ \forall a, b \in \mathbb{Z}$.
- d. Elemento neutro de la suma: $0 + a = a \ \forall a \in \mathbb{Z}$.
- e. Elemento simétrico (u opuesto) de la suma: $a + (-a) = 0 \ \forall a \in \mathbb{Z}$.
- f. Propiedad de cierre del producto: $a \cdot b \in \mathbb{Z} \ \forall a, b \in \mathbb{Z}$.
- g. Propiedad asociativa del producto: $(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c) \ \forall a, b, c \in \mathbb{Z}$.
- h. Propiedad conmutativa del producto: $a \cdot b = b \cdot a \ \forall a, b \in \mathbb{Z}$.
- i. Elemento neutro del producto: $1 \cdot a = a \ \forall a \in \mathbb{Z}$.
- j. Propiedad distributiva del producto sobre la suma: $a \cdot (b+c) = (a \cdot b) + (a \cdot c) \ \forall a,b,c \in \mathbb{Z}$.

Al introducir el opuesto de la suma, se puede definir bien la resta como $a-b=a+(-b) \ \forall a,b \in \mathbb{Z}$.

En el conjunto de los enteros todo número tiene un anterior y un posterior.

2.3 El conjunto de los números racionales Q

Los números enteros (salvo el -1 y 1) no tienen elemento simétrico (inverso) para el producto, de manera que no puede definirse la división. Para ello es necesario extender el conjunto de los enteros con los números fraccionarios, que se definen de la forma a/b donde el numerador a y el denominador b son números enteros primos entre si (por ejemplo 1/2 o -5/3).

Extendiendo el orden y las operaciones de los enteros a estos números se obtiene el conjunto de los números $racionales \mathbb{Q}$ con las siguientes propiedades que lo dotan de estructura de $cuerpo\ conmutativo\ totalmente\ ordenado$:

- a. Propiedad de cierre de la suma: $a + b \in \mathbb{Q} \ \forall a, b \in \mathbb{Q}$.
- b. Propiedad asociativa de la suma: $(a+b)+c=a+(b+c) \ \forall a,b,c \in \mathbb{Q}$.
- c. Propiedad conmutativa de la suma: $a + b = b + a \ \forall a, b \in \mathbb{Q}$.
- d. Elemento neutro de la suma: $0 + a = a \ \forall a \in \mathbb{Q}$.
- e. Elemento simétrico (u opuesto) de la suma: $a + (-a) = 0 \ \forall a \in \mathbb{Q}$.

- f. Propiedad de cierre del producto: $a \cdot b \in \mathbb{Q} \ \forall a, b \in \mathbb{Q}$.
- g. Propiedad asociativa del producto: $(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c) \ \forall a, b, c \in \mathbb{Q}$.
- h. Propiedad conmutativa del producto: $a \cdot b = b \cdot a \ \forall a, b \in \mathbb{Q}$.
- i. Elemento neutro del producto: $1 \cdot a = a \ \forall a \in \mathbb{Q}$.
- j. Elemento simétrico (inverso) del producto: $a \cdot a^{-1} = 1 \ \forall a \neq 0 \in \mathbb{Q}$.
- k. Propiedad distributiva del producto sobre la suma: $a \cdot (b+c) = (a \cdot b) + (a \cdot c) \ \forall a,b,c \in \mathbb{Q}$.

Al introducir el inverso del producto, se puede definir la división como $a/b = a \cdot b^{-1} \ \forall a, b \in \mathbb{Q}$.

A diferencia de los enteros, aunque los racionales también tienen un orden total, el orden es *denso*, es decir, entre dos números racionales cualesquiera siempre existe otro número racional (en realidad infinitos), por lo que no existe el anterior y el posterior de cualquier número racional.

2.4 El conjunto de los números irracionales

Muy pronto los griegos se dieron cuenta de que había otra clase de números que no podían representarse como cociente de números enteros y por tanto no pertenecían al conjunto de los números racionales, de manera que este conjunto es incompleto. El ejemplo clásico es el número $\sqrt{2}$ que se obtiene al aplicar el teorema de Pitágoras para calcular la longitud de la hipotenusa de un triángulo rectángulo con ambos lados de longitud 1.

Teorema 2.1 (Irracionalidad de $\sqrt{2}$). El número $\sqrt{2}$ no es racional.

i Demostración

Demostración. Probar que $\sqrt{2}$ no es racional es equivalente a probar que no existe un número racional m/n tal que $(m/n)^2=2$. La demostración de este último resultado es sencilla por reducción al absurdo.

Supongamos que existe un número m/n con $n, m \in \mathbb{Z}$ primos entre si, tal que $(m/n)^2 = 2$, o lo que es lo mismo,

$$m^2 = 2n^2.$$

De aquí se puede deducir que m^2 es par, lo que implica que m también es par, pues si m fuese impar, su cuadrado también sería impar. En tal caso, m podría escribirse como m=2k con $k\in\mathbb{Z}$ y se tendría $m^2=4k^2$. Sustituyendo ahora en la ecuación inicial se tiene $4k^2=2n^2$, lo que implica que $2k^2=n^2$. Siguiendo el mismo razonamiento anterior, se tendría que n también sería un número par, por lo se obtiene un absurdo ya que partimos de que m y n eran primos entre sí.

Estos números que no son racionales se denominan *irracionales*, y, al igual que los números racionales, es un conjunto denso.

Teorema 2.2. Entre dos números racionales siempre existe un número irracional.

i Demostración

Demostración. Tomemos para empezar un número irracional entre 0 y 1, como por ejemplo, $1/\sqrt{2} = 0.7071...$, y consideremos dos números racionales cualesquiera $a, b \in \mathbb{Q}$, tales que a < b. Como $0 < 1/\sqrt{2} < 1$ y b - a > 0, se tiene que

$$0(b-a) < \frac{b-a}{\sqrt{2}} < 1(b-a),$$

o lo que es lo mismo, simplificando

$$0<\frac{b-a}{\sqrt{2}}<(b-a).$$

Si ahora sumamos a a cada término de la desigualdad se tiene

$$a < a + \frac{b - a}{\sqrt{2}} < b,$$

de manera que el número $a+\frac{b-a}{\sqrt{2}}$ está entre a y b, pero además, se trata de un número irracional, ya que es el producto de un número irracional $1/\sqrt{2}$ por un racional b-a y más otro racional a.

En realidad, se puede probar que entre dos números racionales no solo existe un número irracional, sino una infinidad de ellos. Y del mismo modo, se puede probar que entre dos números irracionales existe una infinidad de números racionales.

2.5 El conjunto de los números reales

La extensión de los números racionales con los irracionales da lugar al conjunto de los números reales. Su construcción formal puede realizarse de distintas maneras (cortaduras de Dedekind o sucesiones de Cauchy), pero todas ellas satisfacen la siguiente definición axiomática:

Definición 2.1 (Números reales). El sistema de los números reales $(\mathbb{R}, +, \cdot, <)$ está formado por un conjunto no vacío de números \mathbb{R} , sobre los que se definen dos operaciones binarias, suma (+) y producto (\cdot) , que satisfacen los siguientes axiomas:

Axiomas de cuerpo algebraico. $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ es un cuerpo abeliano:

- Axioma 1. Propiedad de cierre de la suma: $\forall a, b \in \mathbb{R}, a+b \in \mathbb{R}$.
- Axioma 2. Propiedad asociativa de la suma: $\forall a, b, c \in \mathbb{R}, (a+b) + c = a + (b+c)$.
- Axioma 3. Propiedad conmutativa de la suma: $\forall a,b \in \mathbb{R},\, a+b=b+a.$
- Axioma 4. Elemento neutro de la suma: $\forall a \in \mathbb{R}$, existe un elemento $0 \in \mathbb{R}$, tal que 0 + a = a.
- Axioma 5. Elemento simétrico (u opuesto) de la suma: $\forall a \in \mathbb{R}$, existe un número $-a \in \mathbb{R}$, tal que a + (-a) = 0.
- Axioma 6. Propiedad de cierre del producto: $\forall a, b \in \mathbb{R}, a \cdot b \in \mathbb{R}$.
- Axioma 7. Propiedad asociativa del producto: $\forall a, b, c \in \mathbb{R}, (a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$.
- Axioma 8. Propiedad conmutativa del producto: $\forall a, b \in \mathbb{R}, a \cdot b = b \cdot a$.
- Axioma 9. Elemento neutro del producto: $\forall a \in \mathbb{R}$, existe un número $1 \in \mathbb{R}$ {0}, tal que $1 \cdot a = a$.
- Axioma 10. Elemento simétrico (o inverso) del producto: $\forall a \in \mathbb{R} \{0\}$, existe un número $a^{-1} \in \mathbb{R}$, tal que $a \cdot a^{-1} = 1$.
- Axioma 11. Propiedad distributiva del producto sobre la suma: $\forall a, b, c \in \mathbb{R}, a \cdot (b + c) = (a \cdot b) + (a \cdot c).$

Axiomas de orden. Existe un subconjunto no vacío $\mathbb{R}^+ \subset \mathbb{R}$, llamado el conjunto de los *números reales positivos*, que verifica los siguientes axiomas:

- Axioma 12. Cierre del la suma en los reales positivos: $\forall a, b \in \mathbb{R}^+, a+b \in \mathbb{R}^+$.
- Axioma 13. Cierre del producto en los reales positivos: $\forall a, b \in \mathbb{R}^+, a \cdot b \in \mathbb{R}^+$.
- Axioma 14. Propiedad de tricotomía: $\forall a, b \in \mathbb{R}$, una y solo una de las siguientes alternativas es cierta: $a \in \mathbb{R}^+$, a = 0 o $-a \in \mathbb{R}^+$.

Axioma de completitud

• Axioma 15. Axioma del supremo: Si un subconjunto no vacío $A \subset \mathbb{R}$ tiene una cota superior, entonces tiene un supremo $\sup(A) \in \mathbb{R}$.

El último axioma es el que diferencia el conjunto de los números reales de otros cuerpos totalmente ordenados como los racionales.

A partir de las propiedades de las suma y el producto se pueden definir nos nuevas operaciones en \mathbb{R} .

Definición 2.2 (Resta). Dados dos números reales $a, b \in \mathbb{R}$, se define la *resta* de a y b, y se denota a - b, como la suma de a y el opuesto de b,

$$a - b = a + (-b).$$

Definición 2.3 (División). Dados dos números reales $a, b \in \mathbb{R}$ tal que $b \neq 0$, se define la división de a y b, y se denota a/b, como el producto de a y el inverso de b,

$$\frac{a}{b} = a \cdot b^{-1}.$$

Definición 2.4 (Potencia). Dado un número reale $a \in \mathbb{R}$ y un número $n \in \mathbb{N}$, se define la *potencia* de a elevado a n, y se denota a^n , como el producto de a por sí mismo n veces,

$$a^n = a \cdot \stackrel{n}{\dots} \cdot a$$
.

A a se le llama la base y a n el exponente de la potencia.

$$\frac{a}{b} = a \cdot b^{-1}.$$

Proposición 2.1 (Propiedades de algebraicas). De los axiomas de cuerpo algebraico de los números reales se deducen las siguientes propiedades:

- a. El elemento neutro de la suma (0) es único: $\forall a, b \in \mathbb{R}$, si a+b=a, entonces b=0.
- b. El elemento neutro del producto (1) es único: $\forall a, b \in \mathbb{R}$, si $a \cdot b = a$, entonces b = 1.
- c. El elemento opuesto de un número real es único: $\forall a, b \in \mathbb{R}$, si a + b = 0, entonces b = -a.

- d. El elemento inverso de un número real es único: $\forall a, b \in \mathbb{R}$, si $a \cdot b = 1$, entonces $b = a^{-1}$.
- e. El producto de cualquier número real por el elemento neutro de la suma, es el elemento neutro de la suma: $\forall a \in \mathbb{R}, a \cdot 0 = 0.$
- f. El producto de cualquier número real por el opuesto de 1 es el opuesto del número: $\forall a \in \mathbb{R} \ (-1) \cdot a = -a$.
- g. El opuesto del opuesto de un número real es el propio número: $\forall a \in \mathbb{R}, -(-a) = a$.
- h. El producto de los opestos de dos números reales es igual al producto de los números: $\forall a, b \in \mathbb{R}, \ (-a) \cdot (-b) = a \cdot b.$
- i. El inverso de un número real distinto de 0 también es distinto de 0: $\forall a, \in \mathbb{R}$, si $a \neq 0$, entonces $a^{-1} \neq 0$.
- j. El inverso del inverso de un número real distinto de 0 es el propio número: $\forall a \in \mathbb{R}$, si $a \neq 0$, entonces $(a^{-1})^{-1} = a$.
- $k. \ \forall a,b,c \in \mathbb{R}, \ si \ a \cdot b = a \cdot c \ y \ a \neq 0, \ entonces \ b = c.$
- l. Si el producto de dos números reales es 0, entonces alguno de los dos números es $0: \forall a, b \in \mathbb{R}$, si $a \cdot b = 0$, entonces a = 0 o b = 0.
- m. El inverso del producto de dos números distintos de 0 es el producto de los inversos: $\forall a, b \in \mathbb{R}$, si $a \neq 0$ y $b \neq 0$, entonces $(a \cdot b)^{-1} = a^{-1} \cdot b^{-1}$.

i Demostración

Demostración. Veamos la prueba de cada propiedad.

a. Supongamos que existe $b \in \mathbb{R}$ tal que $b + a = a \ \forall a \in \mathbb{R}$. Entonces

$$b+a=a \Leftrightarrow b+a+(-a)=a+(-a)$$

$$\Leftrightarrow b+0=0 \qquad \qquad \text{(axioma 5)}$$

$$\Leftrightarrow b=0 \qquad \qquad \text{(axioma 4)}$$

b. Supongamos que existe $b \in \mathbb{R}$ tal que $b \cdot a = a \ \forall a \in \mathbb{R}$. Entonces

$$\begin{aligned} b \cdot a &= a \Leftrightarrow b \cdot a \cdot a^{-1} = a \cdot a^{-1} \\ &\Leftrightarrow b \cdot 1 = 1 \\ &\Leftrightarrow b = 1 \end{aligned} \qquad \text{(axioma 10)}$$

c. Sean $a, b \in \mathbb{R}$ tales que a + b = 0. Entonces

$$\begin{aligned} a+b &= 0 \Leftrightarrow (-a)+a+b = (-a)+0 \\ &\Leftrightarrow (-a)+a+b = -a & \text{(axioma 4)} \\ &\Leftrightarrow 0+b = -a & \text{(axioma 5)} \\ &\Leftrightarrow b = -a & \text{(axioma 4)} \end{aligned}$$

d. Sean $a, b \in \mathbb{R}$ tales que $a \cdot b = 1$. Entonces

$$\begin{aligned} a \cdot b &= 1 \Leftrightarrow a^{-1} \cdot a \cdot b = a^{-1} \cdot 1 \\ &\Leftrightarrow a^{-1} \cdot a \cdot b = a^{-1} \\ &\Leftrightarrow 1 \cdot b = a^{-1} \end{aligned} \qquad \text{(axioma 9)} \\ \Leftrightarrow b &= a^{-1} \end{aligned} \qquad \text{(axioma 10)}$$

e. Para cualquier $a \in \mathbb{R}$, se tiene

$$a = a \cdot 1$$
 (axioma 9)
 $= a \cdot (1+0)$ (axioma 4)
 $= (a \cdot 1) + (a \cdot 0)$ (axioma 11)
 $= a + (a \cdot 0)$ (axioma 9)

Así pues, por la propiedad (a) se tiene que $a \cdot 0 = 0$.

f. Para cualquier $a \in \mathbb{R}$, se tiene

$$\begin{array}{ll} a+(-1)\cdot a=1\cdot a+(-1)\cdot a & \text{(axioma 9)}\\ &=(1+(-1))\cdot a & \text{(axioma 11)}\\ &=0\cdot a & \text{(axioma 5)}\\ &=0 & \text{(prop. e)} \end{array}$$

Como $a + (-1) \cdot a = 0$, aplicando la propiedad (c) se tiene $(-1) \cdot a = -a$.

g. Para cualquier $a \in \mathbb{R}$, se tiene

$$a+(-a)=0 \Leftrightarrow (-a)+a=0 \qquad \qquad \text{(axiomas 5 y 3)}$$

$$\Leftrightarrow a=-(-a) \qquad \qquad \text{(prop. c)}$$

h. Para cualesquiera $a, b \in \mathbb{R}$,
se tiene

$$(-a) \cdot (-b) = ((-1) \cdot a) \cdot ((-1) \cdot b)$$
 (prop. f)

$$= ((-1) \cdot (-1)) \cdot a \cdot b$$
 (axioma 7)

$$= -(-1) \cdot a \cdot b$$
 (prop. f)

$$= 1 \cdot a \cdot b$$
 (prop. g)

$$= a \cdot b$$
 (axioma 9)

i. Sea $a \in \mathbb{R}$ con $a \neq 0$. Supongamos ahora que $a^{-1} = 0$. Entonces,

$$0 = a \cdot 0$$
 (prop. e)
 $= a \cdot a^{-1}$
 $= 1$ (axioma 10)

Así pues, llegamos a que 0=1, lo cual es absurdo, por lo que $a^{-1}\neq 0$.

j. Para cualquier $a \in \mathbb{R}$, se tiene

$$a \cdot a^{-1} = 1 \Leftrightarrow a^{-1} \cdot a = 1$$
 (axiomas 10 y 8)
$$\Leftrightarrow a = (a^{-1})^{-1}$$
 (prop. d)

k. Sean $a,b,c\in\mathbb{R}$ tales que $a\cdot b=a\cdot c$ y $a\neq 0.$ Entonces se tiene

$$\begin{aligned} a \cdot b &= a \cdot c \Leftrightarrow a^{-1} \cdot (a \cdot b) = a^{-1} \cdot (a \cdot c) \\ &\Leftrightarrow (a^{-1} \cdot a) \cdot b = (a^{-1} \cdot a) \cdot c \\ &\Leftrightarrow 1 \cdot b = 1 \cdot c \\ &\Leftrightarrow b = c \end{aligned} \qquad \text{(axioma 7)}$$

1. Sean $a, b \in \mathbb{R}$ tales que $a \cdot b = 0$. Supongamos que $a \neq 0$, entonces se tiene

$$a \cdot b = 0 \Leftrightarrow a^{-1} \cdot (a \cdot b) = a^{-1} \cdot 0$$

$$\Leftrightarrow a^{-1} \cdot (a \cdot b) = 0 \qquad \text{(prop. e)}$$

$$\Leftrightarrow (a^{-1} \cdot a) \cdot b = 0 \qquad \text{(axioma 7)}$$

$$\Leftrightarrow 1 \cdot b = 0 \qquad \text{(axioma 10)}$$

$$\Leftrightarrow b = 0 \qquad \text{(axioma 9)}$$

m. Sean $a, b \in \mathbb{R}$, tales que $a \neq 0$ y $b \neq 0$. Entonces, por la propiedad (l) se tiene $a \cdot b \neq 0$, y se tiene

$$(a \cdot b) \cdot (a \cdot b)^{-1} = 1 \Leftrightarrow a^{-1} \cdot (a \cdot b) \cdot (a \cdot b)^{-1} = a^{-1} \cdot 1$$

$$\Leftrightarrow a^{-1} \cdot (a \cdot b) \cdot (a \cdot b)^{-1} = a^{-1} \qquad \text{(axioma 9)}$$

$$\Leftrightarrow (a^{-1} \cdot a) \cdot b \cdot (a \cdot b)^{-1} = 1 \qquad \text{(axioma 7)}$$

$$\Leftrightarrow 1 \cdot b \cdot (a \cdot b)^{-1} = a^{-1} \qquad \text{(axioma 10)}$$

$$\Leftrightarrow b \cdot (a \cdot b)^{-1} = a^{-1} \Leftrightarrow \qquad \text{(axioma 9)}$$

$$\Leftrightarrow b^{-1} \cdot b \cdot (a \cdot b)^{-1} = b^{-1}a^{-1}$$

$$\Leftrightarrow b^{-1} \cdot b \cdot (a \cdot b)^{-1} = a^{-1}b^{-1} \qquad \text{(axioma 8)}$$

$$\Leftrightarrow (b^{-1} \cdot b) \cdot (a \cdot b)^{-1} = a^{-1}b^{-1} \qquad \text{(axioma 7)}$$

$$\Leftrightarrow 1 \cdot (a \cdot b)^{-1} = a^{-1}b^{-1} \qquad \text{(axioma 10)}$$

$$\Leftrightarrow (a \cdot b)^{-1} = a^{-1}b^{-1} \qquad \text{(axioma 9)}$$

A partir del axioma de tricotomía se puede descomponer el conjunto de los números reales en tres conjuntos disjuntos, los positivos \mathbb{R}^+ , $\{0\}$ y los negativos \mathbb{R}^- .

Definición 2.5 (Números reales positivos y negativos). Dado un número $a \in \mathbb{R}$, se dice que:

- a es estríctamente positivo, y lo notamos a > 0, si $a \in \mathbb{R}^+$.
- a es positivo, y lo notamos $a \ge 0$, si $a \in \mathbb{R}^+$ o a = 0.
- a es estríctamente negativo, y lo notamos a < 0, si $-a \in \mathbb{R}^+$.
- a es negativo, y lo notamos $a \leq 0$, si $-a \in \mathbb{R}^+$ o -a = 0.

También se puede definir la siguiente relación que permite comparar dos números.

Definición 2.6 (Relaciones de comparación). Dados dos números $a, b \in \mathbb{R}$, se dice que:

- a es menor que b, y lo notamos a < b, si $b a \in \mathbb{R}^+$.
- a es menor o igual que b, y lo notamos $a \leq b$, si $b a \in \mathbb{R}^+$ o b a = 0.
- a es mayor que b, y lo notamos a > b, si $a b \in \mathbb{R}^+$.
- a es mayor o igual que b, y lo notamos $a \ge b$, si $a b \in \mathbb{R}^+$ o a b = 0.

De esta definición y los axiomas de orden de los números reales se deduce que la relación \leq es una relación de orden.

Proposición 2.2. La relación menor o igual \leq es una relación de orden, es decir, cumple las propiedades

- a. Reflexiva: $\forall a \in \mathbb{R}, a \leq a$.
- b. Antisimétrica: $\forall a, b \in \mathbb{R}$, si $a \leq b$ y $b \leq a$, entonces a = b.
- c. Transitiva: $\forall a, b, c \in \mathbb{R}$, $si \ a \leq b \ y \ b \leq c$, entonces $a \leq c$.

i Demostración

Demostración. Veamos que la relación \leq cumple las propiedades reflexiva, antisimétrica y transitiva.

- a. Propiedad reflexiva: Para cualquier $a \in \mathbb{R}$ se cumple que a-a=0, luego $a \leq a$.
- b. Propiedad antisimétrica: Para cualesquiera $a, b \in \mathbb{R}$, si $a \leq b$ y $b \leq a$, se tiene que $b-a \geq 0$ y $-(b-a) \geq 0$, de donde se deduce, por el axioma de tricotomía, que a-b=0, y aplicando los axiomas 4 y 5 se llega a a=b.
- c. Propiedad transitiva: Para cualesquiera $a,b,c\in\mathbb{R}$, tales que $a\leq b$ y $b\leq c$, se tiene que $b-a\geq 0$ y $c-b\geq 0$. Supongamos que b-a>0 y c-b>0. Entonces, por el axioma 12 se tiene

$$\begin{array}{c} (b-a)+(c-b)>0 & \text{(axioma 2)} \\ \Leftrightarrow (b-b)+(c-a)>0 & \text{(axioma 5)} \\ \Leftrightarrow 0+(c-a)>0 & \text{(axioma 4)} \\ \Leftrightarrow c-a>0 \Leftrightarrow a\leq c. \end{array}$$

Si b-a=0, entonces a=b y como $b\leq c$ resulta evidente que $a\leq c$. El mismo razonamiento puede aplicarse si c-b=0.

Proposición 2.3 (Propiedades de orden). De los axiomas de orden de los números reales se deducen las siquientes propiedades:

- a. El cuadrado de cualquier número real distinto de 0 es positivo: $\forall a \in \mathbb{R}$, si $a \neq 0$, entonces $a^2 > 0$.
- b. El elemento neutro de la suma es menor que el elemento neutro del producto: 0 < 1.
- c. Cualquier número natural es positivo: $\forall n \in \mathbb{N}, 0 < n$.
- d. La suma preserva el orden: $\forall a, b, c \in \mathbb{R}$, si a < b, entonces a + c < b + c.
- $e. \ \forall a, b, c, d \in \mathbb{R}, \ si \ a < b \ y \ c < d, \ entonces \ a + c < b + d.$
- f. El producto por un número real positivo preserva el orden: $\forall a, b, c \in \mathbb{R}$, si a < b y c > 0, entonces $a \cdot c < b \cdot c$.
- g. El producto por un número real negativo invierte el orden: $\forall a, b, c \in \mathbb{R}$, si a < b y c < 0, entonces $a \cdot c > b \cdot c$.
- h. El inverso de un número real positivo es positivo y el de un número real negativo es negativo: $\forall a \in \mathbb{R}$, si a > 0, entonces $a^{-1} > 0$, y si a < 0, entonces $a^{-1} < 0$.
- i. El producto de dos números reales es positivo si y solo si los dos números son positivos, o bien los dos números son negativos: $\forall a,b \in \mathbb{R},\ a\cdot b>0$ si y solo si a>0 y b>0, o a<0 y b<0.
- j. El producto de dos números reales es negativo si y solo si uno de los números es positivo y el otro negativo: $\forall a,b \in \mathbb{R},\ a \cdot b < 0\ si\ y\ solo\ si\ a > 0\ y\ b < 0,\ o\ a < 0\ y\ b > 0.$
- $k. \ \forall a, b \in \mathbb{R}, \ si \ a < b, \ entonces \ a < \frac{a+b}{2} < b.$
- l. Cualquier número no negativo que es menor que cualquier número positivo es 0: $\forall a, b \in \mathbb{R}$, si $0 \le a < b$ y b > 0, entonces a = 0.

Demostración. Veamos la prueba de cada propiedad.

- a. Sea $a\in\mathbb{R}$ con $a\neq 0$. Entonces, por la propiedad de tricotomía se tiene que $a\in\mathbb{R}^+$ o $-a\in\mathbb{R}^+$.
 - Si $a \in \mathbb{R}^+$, entonces, por el axioma 13, se tiene $a \cdot a \in \mathbb{R}^+$, y por tanto $a^2 \in \mathbb{R}^+$, de manera que $a^2 > 0$.
 - Si $-a \in \mathbb{R}^+$, entonces, de nuevo por el axioma 13, se tiene

$$-a \in \mathbb{R}^{+} \Leftrightarrow (-a) \cdot (-a) \in \mathbb{R}^{+} \qquad \text{(axioma 13)}$$

$$\Leftrightarrow (-1) \cdot a \cdot (-1) \cdot a \in \mathbb{R}^{+} \qquad \text{(prop. f)}$$

$$\Leftrightarrow (-1) \cdot (-1) \cdot a \cdot a \in \mathbb{R}^{+} \qquad \text{(axioma 7)}$$

$$\Leftrightarrow 1 \cdot a^{2} \in \mathbb{R}^{+} \qquad \text{(prop. h)}$$

$$\Leftrightarrow a^{2} \in \mathbb{R}^{+} \qquad \text{(axioma 9)}$$

y se concluye de nuevo que $a^2 > 0$.

- b. Por el axioma 9 se tiene que $1 = 1 \cdot 1 = 1^2$, y por la propiedad anterior se tiene que $1^2 > 0$, con lo que 1 > 0.
- c. Haremos la prueba por inducción. Para n=1 ya hemos visto en resultado anterior que 1>0. Supongamos ahora que para cualquier $n\in\mathbb{N}$ se cumple que n-1>0. Entonces, como 1>0, por el axioma 12 se tiene que n-1+1>0, de lo que se deduce, por los axiomas 5 y 4 que n>0.
- d. Sean $a,b \in \mathbb{R}$ tales que a < b. Entonces b-a > 0. Si tomamos ahora cualquier $c \in \mathbb{R}$ se cumple que

$$\begin{array}{ll} b-a>0 \Leftrightarrow b+0-a>0 & \text{(axioma 4)} \\ \Leftrightarrow b+(c-c)-a>0 & \text{(axioma 5)} \\ \Leftrightarrow (b+c)-(a+c)>0 & \text{(axioma 2)} \\ \Leftrightarrow a+c< b+c. \end{array}$$

e. Sean $a, b, c, d \in \mathbb{R}$ tales que a < b y c < d. Entonces se tiene

$$\begin{array}{c} b-a>0 \ \text{y} \ d-c>0 \Leftrightarrow (b-a)+(d-c)>0 \\ \Leftrightarrow (b+d)-a-c>0 \\ \Leftrightarrow (b+d)-(a+c)>0 \end{array} \qquad \text{(axioma 12)}$$

$$\Leftrightarrow (b+d)-(a+c)>0 \\ \Leftrightarrow a+c< b+d. \end{array}$$

f. Sean $a,b\in\mathbb{R}$ tales que a< b. Entonces b-a>0. Si tomamos ahora cualquier $c\in\mathbb{R}$ con c>0, se cumple que

$$\begin{array}{l} b-a>0 \ \text{y} \ c>0 \Leftrightarrow (b-a)\cdot c>0 \\ \Leftrightarrow (b\cdot c)-(a\cdot c)>0 \\ \Leftrightarrow a\cdot c< b\cdot c. \end{array} \tag{axioma 13}$$

g. Sean $a,b \in \mathbb{R}$ tales que a < b. Entonces b-a > 0. Si tomamos ahora cualquier $c \in \mathbb{R}$ con c < 0, entonces -c > 0 y se cumple que

$$\begin{array}{lll} b-a<0 \ {\rm y} & -c>0 \Leftrightarrow (b-a)\cdot (-c)>0 & {\rm (axioma\ 13)} \\ &\Leftrightarrow (b\cdot (-c))-(a\cdot (-c))>0 & {\rm (axioma\ 11)} \\ &\Leftrightarrow -(b\cdot c)+(a\cdot c)>0 & {\rm (prop.\ f)} \\ &\Leftrightarrow (a\cdot c)-(b\cdot c)>0 & {\rm (axioma\ 3)} \\ &\Leftrightarrow a\cdot c>b\cdot c. \end{array}$$

h. Sea $a \in \mathbb{R}$ tal que a > 0. Entonces, por la propiedad de tricotomía, $a \neq 0$ y, por la propiedad algebraica i, $a^{-1} \neq 0$. Supongamos que $a^{-1} < 0$. Entonces, se tiene

$$a>0$$
 y $a^{-1}<0\Leftrightarrow a\cdot a^{-1}< a\cdot 0$ (prop. de orden f)
$$\Leftrightarrow a\cdot a^{-1}<0$$
 (prop. algebraica e)
$$\Leftrightarrow a\cdot a^{-1}\neq 1$$
 (prop. orden b)

De esta manera llegamos a una contradicción y por consiguiente, $a^{-1} > 0$. De forma similar se prueba que si a < 0, entonces $a^{-1} < 0$.

i. Sean $a,b\in\mathbb{R}$ tales que $a\cdot b>0$. Entonces, por la propiedad algebraica e se tiene $a\neq 0$ y $b\neq 0$, y por la propiedad de tricotomía se tiene que a>0 o a<0.

Si a > 0, entonces por la propiedad anterior, $a^{-1} > 0$, y se tiene

$$\begin{array}{c} a^{-1} > 0 \text{ y } a \cdot b > 0 \Rightarrow a^{-1} \cdot (a \cdot b) > 0 \\ \qquad \Rightarrow (a^{-1} \cdot a) \cdot b > 0 \\ \qquad \Rightarrow b > 0 \end{array} \qquad \begin{array}{c} \text{(axioma 13)} \\ \text{(axioma 7)} \\ \text{(axioma 10)} \end{array}$$

Y si a < 0, entonces, por la propiedad anterior, $a^{-1} < 0$, y se tiene

$$\begin{array}{c} a^{-1} < 0 \text{ y } a \cdot b > 0 \Rightarrow a^{-1} \cdot (a \cdot b) < a^{-1} \cdot 0 & \text{(prop. orden g)} \\ \Rightarrow a^{-1} \cdot (a \cdot b) < 0 & \text{(prop. algebraica e)} \\ \Rightarrow (a^{-1} \cdot a) \cdot b < 0 & \text{(axioma 7)} \\ \Rightarrow b < 0 & \text{(axioma 10)} \end{array}$$

Para probar la otra implicación, si a>0 y b>0, por el axioma 13 se tiene que $a\cdot b>0$, y si a<0 y b<0 entonces se tiene

$$a < 0$$
 y $b < 0 \Rightarrow a \cdot b > a \cdot 0$ (prop. orden g)
 $\Rightarrow a \cdot b > 0$ (prop. algebraica e)

- j. Se demuestra de forma análoga a la propiedad anterior.
- k. Sean $a, b \in \mathbb{R}$ tales que a < b. Entonces se tiene

$$\begin{aligned} 2 \cdot a &= (1+1) \cdot a = (1 \cdot a) + (1 \cdot a) & \text{(axioma 11)} \\ &= a+a & \text{(axioma 9)} \\ &< a+b & \text{(prop. orden d)} \end{aligned}$$

Por otro lado,

$$2 \cdot b = (1+1) \cdot b = (1 \cdot b) + (1 \cdot b)$$
 (axioma 11)
= $b+b$ (axioma 9)
> $a+b$ (prop. orden d)

Así pues, se puede concluir que $2 \cdot a < a + b < 2 \cdot b$ y ahora se tiene

$$\begin{aligned} 2 \cdot a &< a+b < 2 \cdot b \Leftrightarrow 2^{-1} \cdot (2 \cdot a) < 2^{-1} \cdot (a+b) < 2^{-1} \cdot (2 \cdot b) \\ & \qquad \qquad \text{(prop. orden f)} \\ & \Leftrightarrow (2^{-1} \cdot 2) \cdot a < 2^{-1} \cdot (a+b) < (2^{-1} \cdot 2) \cdot b \quad \text{(axioma 7)} \\ & \Leftrightarrow 1 \cdot a < 2^{-1} \cdot (a+b) < 1 \cdot b \qquad \qquad \text{(axioma 10)} \\ & \Leftrightarrow a < 2^{-1} \cdot (a+b) < b \qquad \qquad \text{(axioma 9)} \\ & \Leftrightarrow a < \frac{a+b}{2} < b. \end{aligned}$$

l. Sea $a \in \mathbb{R}$ tal que $0 \le a < b \ \forall b \in \mathbb{R}$ con b > 0. Como $a \ge 0$ se tiene que a > 0 o a = 0. Si a > 0, por la propiedad anterior se tiene $0 < \frac{a}{2} < a$. Si ahora tomamos $b = \frac{a}{2} > 0$ se tiene que $a < \frac{a}{2}$, lo cual es absurdo, y, por tanto, debe ser a = 0.

A partir del axioma de tricotomía también se puede definir el valor absoluto de un número real.

Definición 2.7 (Valor absoluto). Dado un número $a \in \mathbb{R}$, se define el valor absoluto de a, y se denota |a|, como

$$|a| = \begin{cases} a & \text{si } a \ge 0, \\ -a & \text{si } a < 0. \end{cases}$$

Ejemplo 2.1. |1.5| = 1.5 y |-1/2| = 1/2.

Como se verá en el próximo capítulo, el valor absoluto permite calcular la distancia entre dos números reales en la recta real.

Proposición 2.4 (Propiedades del valor absoluto). Se cumplen las siguientes propiedades del valor absoluto:

- a. El valor absoluto de un número real y de su opuesto es el mismo: $\forall a \in \mathbb{R}, |a| = |-a|$.
- $b. \ \forall a, b \in \mathbb{R}, \ |a-b| = |b-a|.$
- c. El valor absoluto del producto de dos números reales es igual que el producto de los valores absolutos de los números: $\forall a, b \in \mathbb{R}, |a \cdot b| = |a| \cdot |b|$.
- $d. \ \forall a,b \in \mathbb{R}, \ si \ b > 0 \ entonces \ |a| \le b \ si \ y \ solo \ si \ -b \le a \le b.$
- $e. \ \forall a \in \mathbb{R}, \ |-a| \le a \le |a|.$
- f. Designaldad triangular: $\forall a, b \in \mathbb{R}, |a+b| \leq |a| + |b|$.

i Demostración

Demostración. Veamos la prueba de cada propiedad.

- a. Sea $a \in \mathbb{R}$. Si a = 0 entonces |0| = 0 = |-0|.
 - Si a>0 entonces -a<0, de modo que por la propiedad algebraica g
 se tiene |a|=a=-(-a)=|-a|.

Y si a < 0 entonces -a > 0, de modo que |a| = -a = |-a|.

b. Para cualesquiera $a, b \in \mathbb{R}$ se tiene

$$|a-b| = |-(a-b)|$$
 (prop. valor absoluto a)

$$= |(-1)(a-b)|$$
 (prop. algebraica f)

$$= |((-1) \cdot a) + ((-1) \cdot (-b))|$$
 (axioma 11)

$$= |-a+-(-b)|$$
 (prop. algebraica f)

$$= |-a+b|$$
 (prop. algebraica g)

$$= |b-a|$$
 (axioma 3)

- c. Para cualesquiera $a, b \in \mathbb{R}$, se pueden dar varios casos:
 - Si a>0 y b>0, entonces, por el axioma 12, $a\cdot b>0$ y $|a\cdot b|=a\cdot b=|a|\cdot |b|$.
 - Si a>0 y b<0, entonces, por la propiedad de orden j, $a\cdot b<0$, y se tiene

$$\begin{aligned} |a \cdot b| &= -(a \cdot b) \\ &= (-1) \cdot (a \cdot b) & \text{(prop. algebraica f)} \\ &= a \cdot ((-1) \cdot b) & \text{(axioma 7)} \\ &= a \cdot -b & \text{(prop. algebraica f)} \\ &= |a| \cdot |b|. \end{aligned}$$

- Si a < 0 y b > 0, la prueba es similar al caso anterior.
- Si a < 0 y b < 0, entonces por la propiedad de orden i, $a \cdot b > 0$, y se tiene

$$\begin{aligned} |a \cdot b| &= (a \cdot b) \\ &= 1 \cdot (a \cdot b) \\ &= -(-1) \cdot (a \cdot b) \\ &= (-1) \cdot (-1) \cdot (a \cdot b) \\ &= ((-1) \cdot a) \cdot ((-1) \cdot b) \\ &= -a \cdot -b \\ &= |a| \cdot |b|. \end{aligned} \qquad \text{(axioma 9)}$$
 (prop. algebraica g) (axioma 7)

• a=0 o b=0, entonces por la propiedad algebraica e $a\cdot b=0$ y es evidente que $|a\cdot b|=0=|a|\cdot |b|$.

d. Sean $a, b \in \mathbb{R}$ tales que b > 0. Si $|a| \le b$, entonces $a \le b$ y $-a \le b$, y para esta última desigualdad, si -a < b se tiene

$$-a < b \Rightarrow (-1) \cdot (-a) > (-1) \cdot b$$
 (prop. orden g)
 $\Rightarrow -(-a) > -b$ (prop. algebraica f)
 $\Rightarrow a > -b$ (prop. algebraica g)

Y si -a=b entonces a=-b, por lo que $a\geq -b$, y se concluye que $-b\leq a\leq b$. Para probar la otra implicación supongamos que $-b\leq a\leq b$, entonces $a\leq b$ y por otro lado $a\geq -b$, de donde se tiene, si a>-b

$$a > -b \Rightarrow (-1) \cdot a < (-1) \cdot (-b)$$
 (prop. orden g)
 $\Rightarrow -a < -(-b)$ (prop. algebraica f)
 $\Rightarrow -a < b$. (prop. algebraica g)

Y si a=-b entonces -a=b, por lo que $-a \le b$, y como b>0 se puede concluir que |a| < b.

- e. Sea $a \in \mathbb{R}$. Como $|a| \le |a|$, si |a| > 0, por la propiedad anterior, se tiene que $-|a| \le a \le |a|$, y si |a| = 0, entonces a = 0 y $-|0| \le 0 \le |0|$.
- f. Sean $a, b \in \mathbb{R}$. Por la propiedad anterior se tiene que $-|a| \le a \le |a|$ y $-|b| \le b \le |b|$ de manera que, por la propiedad de orden e, se cumple

$$(-|a|) + (-|b|) \le a + b \le |a| + |b|$$

y por el axioma 11 se tiene

$$-(|a| + |b|) \le a + b \le |a| + |b|$$

de lo que se deduce por la propiedad d que $|a+b| \le |a| + |b|$.

Veremos ahora una serie de consecuencias del axioma de completitud.

Proposición 2.5. Si un subconjunto no vacío $A \subset \mathbb{R}$ tiene una cota inferior, entonces tiene un ínfimo $m \in \mathbb{R}$.

Demostración. Se deja como ejercicio.

Teorema 2.3 (Propiedad arquimediana). Dado un número real $a \in \mathbb{R}$ con a > 0, existe un número natural $n \in \mathbb{N}$ tal que a < n.

Demostración

Demostración. Vamos a demostrarlo por reducción al absurdo. Supongamos que no existe $n \in \mathbb{N}$ tal que x < n. Entonces, x es una cota superior de \mathbb{N} . Por tanto, por el axioma del supremo existe un número $s = \sup(\mathbb{N})$. Por ser supremo, se cumple que existe un número natural $m \in \mathbb{N}$ tal que s-1 < m, pero entonces se tiene que s < m+1, y como $m \in \mathbb{N}$ también $m+1 \in \mathbb{N}$, lo que contradice que s sea cota superior de N.

Corolario 2.1. De la propiedad arquimediana se deducen las siguientes consecuencias:

- $\begin{array}{l} a. \ Si \ a>0 \in \mathbb{R}, \ entonces \ \exists n \in \mathbb{N} \ tal \ que \ 0<\frac{1}{n} < a. \\ b. \ Si \ a>0 \in \mathbb{R}, \ entonces \ \exists n \in \mathbb{N} \ tal \ que \ n-1 \leq a < n. \end{array}$

Teorema 2.4 (Raíz cuadrada). Dado un número real $a \in \mathbb{R}$ con a > 0, existe un número $real \ x \in \mathbb{R} \ tal \ que \ x > 0 \ y \ x^2 = a.$ A este número se le llama raíz cuadrada de a y se denota por \sqrt{a} o $a^{1/2}$.

i Demostración

Demostración. Sea $A = \{y \in \mathbb{R} : y > 0, y^2 < a\}$. A está acotado superiormente ya que si a > 1, el propio a es una cota superior y si no 1 es una cota superior. Por tanto, según el axioma del supremo, existe $x \in \mathbb{R}$ tal que $x = \sup(A) > 0$. Vamos a probar que $x^2 = a$.

Supongamos primero que $x^2 < a$. Entonces $a - x^2 > 0$ y $\frac{a - x^2}{2x + 1} > 0$ ya que 2x + 1 > 0al ser x>0. Por el Corolario 2.1 se tiene que existe $n\in\mathbb{N}$ tal que $\frac{1}{n}<\frac{a-x^2}{2x+1}>0$. Por otro lado, se tiene

$$\left(x+\frac{1}{n}\right)^2 = x^2 + \frac{1}{n^2} + \frac{2x}{n} = x^2 + \frac{1}{n}\left(\frac{1}{n} + 2x\right) \le x^2 + \frac{1}{n}(2x+1) < x^2 + \frac{a-x^2}{2x+1}(2x+1) = x^2 + (a-x^2) = a.$$

Por tanto, $x+\frac{1}{n}\in A$, pero $x+\frac{1}{n}>x$ lo que contradice que x sea cota superior de

Supongamos ahora que $x^2 > a$. Entonces $x^2 - a > 0$ y $\frac{x^2 - a}{2x} > 0$ al ser x > 0. Aplicando de nuevo el Corolario 2.1 se tiene que existe $m \in \mathbb{N}$ tal que $\frac{1}{m} < \frac{x^2 - a}{2x}$ y por tanto $\frac{2x}{m} < x^2 - a$.

Por otro lado, se tiene

$$\left(x - \frac{1}{m}\right)^2 = x^2 + \frac{1}{m^2} - \frac{2x}{m} > x^2 - \frac{2x}{m} > x^2 - (x^2 - a) = a.$$

Por tanto, $x-\frac{1}{m}$ es una cota superior de A, pero $x>x-\frac{1}{m}$, lo que contradice que

Así pues, $x^2 \not < a \ y \ x^2 \not > a$, por lo que tiene que ser $x^2 = a$.

Del mismo modo se puede probar que para cualquier número real $a \in \mathbb{R}$ con a > 0 y para cualquier número natural $n \in \mathbb{N}$ existe un número real $x \in \mathbb{R}$ tal que x > 0 y $x^n = a$. A este número se le llama raíz n-ésima de a.

Teorema 2.5 (Densidad de los números racionales). Dados dos números reales $a, b \in \mathbb{R}$ con a < b, existe un número racional $q \in \mathbb{Q}$ tal que a < q < b.

Demostración

Demostración. Como a < b se tiene que b - a > 0, de manera que por la propiedad arquimediana existe un número natural $n \in \mathbb{N}$ tal que $\frac{1}{n} < b - a$. Por otro lado, como a > 0 también na > 0, y de nuevo por la propiedad arquimediana existe otro número real $m \in \mathbb{N}$ tal que $m-1 \le a < m$, de donde se deduce que $\frac{m-1}{\le} a < \frac{m}{n}$. Consideremos ahora el número racional $q = \frac{m}{n}$. Acabamos de ver que a < q, por lo que solo falta probar que q < b. Para ello, volviendo de nuevo a que $\frac{1}{n} < b - a$, se tiene que

$$\frac{1}{n} < b-a \Rightarrow 1 < nb-na \Rightarrow 1+na < nb$$

pero como habíamos visto que $m-1 \leq na$ se deduce que 1+m-1 < nb, es decir

m < nb, y de aquí se concluye que $q = \frac{m}{n} < b$.

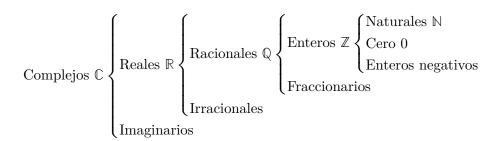
Corolario 2.2 (Densidad de los números irracionales). Dados dos números reales $a, b \in \mathbb{R}$ con a < b, existe un número irracional $p \in \mathbb{R}$ \mathbb{Q} tal que a .

i Demostración

Demostraci'on. Sabemos que $\sqrt{2} \in \mathbb{R}$ \mathbb{Q} y que $\sqrt{2} > 0$, por lo que al aplicar el teorema anterior a los números reales $\frac{a}{\sqrt{2}}$ y $\frac{b}{\sqrt{2}}$ se tiene que existe un número racional $q \in \mathbb{Q}$ tal que $\frac{a}{\sqrt{2}} < q < \frac{b}{\sqrt{2}}$, lo que implica que $a < q\sqrt{2} < b$. Finalmente, si tomamos $p = q\sqrt{2}$, tenemos que es un número irracional que cumple que a .

2.6 Clasificación de los conjuntos numéricos

Con estas extensiones se obtiene la siguiente clasificación de los conjuntos numéricos (se ha incluido también el conjunto de los números complejos $\mathbb C$ que no se verán en este manual.)



En particular se cumple que $\mathbb{N} \subset \mathbb{Z} \subset \mathbb{Q} \subset \mathbb{R} \subset \mathbb{C}$.

3 Topología de la recta real

En este capítulo presentamos, sin profundizar demasiado, los principales conceptos topológicos del conjunto de los números reales, que se serán necesarios en futuros capítulos.

Los números reales pueden representarse geométricamente como puntos de una línea recta que se conoce como la recta real. Existe una biyección entre los puntos de una recta y el conjunto $\mathbb R$ de los números reales, de modo que a cada número real le corresponde un solo punto, y a cada punto, exactamente un número real. Para establecer esta correspondencia se fija un punto O en la recta correspondiente al número real 0 y otro punto A a la derecha de 0, correspondiente al número real 1, de manera que se dice que la abscisa de A es 1 y se denota A(1). A partir de estos dos puntos, hy considerando la distancia entre O y A como unidad de medida, se pueden representar cualquier otro punto B correspondiente al número real x, dibujando a B a la derecha de O si x > 0 y a la izquierda si x < 0, a una distancia |x| de O.



Figura 3.1: La recta real

3.1 Intervalos y entornos

Definición 3.1 (Intervalo abierto). Dados dos números reales tales que $a \le b$, se llama *intervalo abierto* de extremos a y b, y se denota (a,b) al conjunto de números reales comprendidos entre a y b

$$(a, b) = \{x \in \mathbb{R} : a < x < b\}.$$

Definición 3.2 (Intervalo cerrado). Dados dos números reales tales que $a \le b$, se llama intervalo cerrado de extremos a y b, y se denota [a, b] al conjunto de números reales que son mayores o iguales que a y menores o iguales que b

$$[a, b] = \{x \in \mathbb{R} : a < x < b\}.$$

Advertencia

Obsérvese que si $a=b,\,(a,a)=\emptyset$ y $[a,a]=\{a\}.$

Los intervalos también pueden ser abiertos por un lado y cerrados por el otro.

Definición 3.3 (Intervalo semiabierto o semicerrado). Dados dos números reales tales que a < b, se definen los intervalos semiabiertos o semicerrados de extremos a y b de la siguiente manera:

$$(a, b] = \{x \in \mathbb{R} : a < x \le b\}$$
 y $[a, b) = \{x \in \mathbb{R} : a \le x < b\}$

Estos intervalos están acotados ya que a es una cota inferior y b una cota superior, pero también existen intervalos no acotados.

Definición 3.4 (Intervalo abierto no acotado). Dado un número $a \in \mathbb{R}$, se definen los siguientes intervalos abiertos no acotados:

$$(-\infty, a) = \{x \in \mathbb{R} : x < a\} \quad \text{y} \quad (a, \infty) = \{x \in \mathbb{R} : a < x\}$$

Definición 3.5 (Intervalo semiabierto no acotado). Dado un número $a \in \mathbb{R}$, se definen los siguientes intervalos semiabiertos no acotados:

$$(-\infty,a]=\{x\in\mathbb{R}:x\leq a\}\quad \text{y}\quad [a,\infty)=\{x\in\mathbb{R}:a\leq x\}$$

Definición 3.6 (Intervalos anidados). Se dice que una sucesión de intervalos I_n , $n \in \mathbb{N}$ es una sucesión de intervalos anidados si se cumple que $I_{n+1} \subseteq I_n \ \forall n \in \mathbb{N}$.

Ejemplo 3.1. La sucesión de intervalos $I_n = [0, \frac{1}{n}]$, $\forall n \in \mathbb{N}$ es una sucesión de intervalos anidados, ya que para cada $n \in \mathbb{N}$ se cumple que n < n+1 y por tanto $\frac{1}{n} > \frac{1}{n+1}$, de manera que $I_{n+1} = [0, \frac{1}{n+1}] \subseteq [0, \frac{1}{n}] = I_n$.

Teorema 3.1 (Intervalos anidados). Dada una sucesión de intervalos cerrados y anidados $I_n = [a_n, b_n]$, $n \in \mathbb{N}$, existe un número $a \in \mathbb{R}$ tal que $a \in I_n \ \forall n \in \mathbb{N}$. Además, si el ínfimo de las longitudes $\{b_n - a_n : n \in \mathbb{N}\}$ es 0, entonces a es único, es decir, $\bigcap_{n=1}^{\infty} I_n = \{a\}$.

i Demostración

 $\begin{array}{l} Demostraci\'on. \text{ Sea } A = \{a_n : n \in \mathbb{N}\} \text{ y } B = \{b_n : n \in \mathbb{N}\}. \text{ Puesto que los intervalos} \\ \text{est\'an anidados, } A \text{ est\'a acotado superiormente por } b_1 \text{ ya que } a_n \leq b_n \leq b_1 \ \forall n \in \mathbb{N}, \\ \text{y } B \text{ est\'a acotado inferiormente por } a_1 \text{ ya que } a_1 \leq a_n \leq b_n \ \forall n \in \mathbb{N}. \text{ As\'i pues, como} \\ A \text{ est\'a acotado superiormente, por el axioma del supremo, existe } a = \sup(A), \text{ y como } B \text{ est\'a acotado inferiormente, existe } b = \inf(B). \end{array}$

Veamos ahora que $a \leq b$. Para ello basta probar que a es cota inferior de B. Para cualquier $n \in \mathbb{N}$ se cumple que si $k \geq n$ entonces $a_k \leq b_k \leq b_n$ pues $I_n \subseteq I_k$, y si k < n, entonces $a_k \leq a_n \leq b_n$, pues $I_n \subseteq I_k$. Luego b_n es una cota superior de A, y por tanto, $a \leq b_n \ \forall n \in \mathbb{N}$, de manera que a es cota inferior de B. Así pues, como a es cota superior de A e inferior de B, se tiene que $a_n \leq a \leq b_n \ \forall n \in \mathbb{N}$, de manera que $a \in \cap_{n=1}^{\infty} I_n$.

De forma similar se puede probar que $b\in \cap_{n=1}^\infty I_n$, por lo que $\cap_{n=1}^\infty I_n=[a,b]$. Finalmente, veamos que si $\inf(\{b_n-a_n:n\in\mathbb{N}\})=0$ entonces a=b. Para ello, dado $\varepsilon>0$, como $\inf(\{b_n-a_n:n\in\mathbb{N}\})=0$, existe $k\in\mathbb{N}$ tal que $0\le b_k-a_k<\varepsilon$. Como $b\le b_k$ y $a\ge a_k$, se tiene que $0\le b-a\le b_k-a_k<\varepsilon$, de donde se deduce que b-a=0 y por tanto a=b, así que $\cap_{n=1}^\infty I_n=[a,a]=\{a\}$.

Definición 3.7 (Entorno). Dado un número $a \in \mathbb{R}$, se llama *entorno* de a a cualquier intervalo abierto $(a - \varepsilon, a + \varepsilon)$ con $\varepsilon > 0$. El número ε se conoce como radio del entorno.

Para cualquier $\varepsilon > 0$ el conjunto $(a - \varepsilon, a + \varepsilon)$ {a} se llama entorno reducido de a.

3.2 Clasificación de puntos

Un conjunto $A \subset \mathbb{R}$ clasifica los puntos de \mathbb{R} en tres clases: puntos interiores, puntos exteriores y puntos fronteras de A.

Definición 3.8 (Punto interior). Se dice que $a \in \mathbb{R}$ es un *punto interior* de un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$, si existe un entorno de a contenido en A, es decir, existe $\varepsilon > 0$ tal que $(a - \varepsilon, a + \varepsilon) \subseteq A$.

El conjunto de los puntos interiores de A se llama *interior* de A y se denota por Int(A).

Aunque la definición no lo hace explícito, es evidente que si a es un punto interior de A entonces $a \in A$.

Intuitivamente, un punto interior de un conjunto es un punto que no está en el borde del conjunto, es decir, que está rodeado por puntos del conjunto, y por tanto, podemos movernos un poco hacia la izquierda o hacia la derecha del punto sin salirnos del conjunto.

Ejemplo 3.2. 0.9 es un punto interior del intervalo (0,1) ya que podemos tomar $\varepsilon = 0.01$ tal que el entorno $(0.9 - 0.01, 0.9 + 0.01) = (0.89, 0.91) \subset (0,1)$.

Sin embargo, 1 no es un punto interior del intervalo (0,1) ya que por muy pequeño que tomemos $\varepsilon > 0$, $1 + \varepsilon > 1$ y, por tanto, el entorno $(1 - \varepsilon, 1 + \varepsilon)$ siempre tendrá valores mayores que 1, de manera que $(1 - \varepsilon, 1 + \varepsilon) \nsubseteq (0,1)$.

Definición 3.9 (Punto exterior). Se dice que $a \in \mathbb{R}$ es un *punto exterior* de un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$, si existe un entorno de a contenido en el complementario de A, es decir, existe $\varepsilon > 0$ tal que $(x - \varepsilon, x + \varepsilon) \subseteq \overline{A}$.

El conjunto de los puntos exteriores de A se llama exterior de A y se denota por Ext(A).

Una definición equivalente es que un punto es punto exterior de un conjunto si es un punto interior de su complementario.

Ejemplo 3.3. 1.01 es un punto exterior del conjunto $(-\infty, 1)$ ya que tomando $\varepsilon = 0.001$ el entorno $(1.01 - 0.001, 1.01 + 0.001) = (1.009, 1.011) \in \overline{(-\infty, 1)} = [1, \infty).$

Sin embargo, 1 no es un punto exterior del intervalo $(-\infty, 1)$, ya que no es un punto interior del intervalo $\overline{(-\infty,1)} = [1,\infty)$, ya que $1-\varepsilon < 1 \ \forall \varepsilon > 0$, y, por tanto, el entorno $(1-\varepsilon,1+\varepsilon)$ siempre tendrá valores menores que 1, de manera que $(1-\varepsilon,1+\varepsilon) \not\subseteq [1,\infty)$.

Advertencia

El que un punto no sea punto interior de un conjunto no significa que sea un punto exterior. Por ejemplo, 1 no es un punto interior del intervalo (0,1), y tampoco de su complementario $\overline{(0,1)} = (-\infty,0] \cup [1,\infty)$.

Definición 3.10 (Punto frontera). Se dice que $a \in \mathbb{R}$ es un *punto frontera* de un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$, si cualquier entorno de a contiene puntos de A y de su complementario.

El conjunto de los puntos frontera de A se llama frontera de A y se denota por Fr(A).

Una definición equivalente es que un punto es un punto frontera de un conjunto si no es un punto interior ni exterior del conjunto.

Ejemplo 3.4. El punto 1 es un punto frontera del intervalo $[1,\infty)$ ya que no es un punto interior de $[1, \infty)$ ni de su complementario $(-\infty, 1)$.

Proposición 3.1. Todos los puntos de un intervalo abierto son puntos interiores suyos. es decir, dado un intervalo abierto $(a,b) \subseteq \mathbb{R}$, se cumple que $\operatorname{Int}((a,b)) = (a,b)$.

i Demostración

Demostración. Tomemos cualquier punto $x \in (a,b)$, entonces se puede tomar $\varepsilon =$ $\frac{\min\{|x-a|,|x-b\}}{2}$ de manera que el entorno $(x-\varepsilon,x+\varepsilon)\subseteq (a,b)$.

Proposición 3.2. Todos los puntos de un intervalo cerrado, excepto sus extremos, son puntos interiores suyos, es decir, dado un intervalo cerrado $[a,b] \subseteq \mathbb{R}$, se cumple que $\operatorname{Int}([a,b]) = (a,b).$

Demostración. Par ver que a no es un punto interior de [a,b], basta con ver que $a-\varepsilon < a$ para cualquier $\varepsilon > 0$, por lo que el intervalo $(a-\varepsilon,a+\varepsilon)$ irremediablemente contendrá puntos menores que a y, por tanto, $(a-\varepsilon,a+\varepsilon) \nsubseteq [a,b]$.

Un razonamiento análogo se puede utilizar para demostrar que b tampoco es un punto interior de [a, b].

A partir de estas proposiciones, es fácil ver que que para cualquier intervalo abierto (a,b), $\operatorname{Int}((a,b))=(a,b)$, $\operatorname{Ext}((a,b))=(-\infty,a)\cup(b,\infty)$ y $\operatorname{Fr}((a,b))=\{a,b\}$. Y para cualquier intervalo cerrado [a,b], $\operatorname{Int}([a,b])=(a,b)$, $\operatorname{Ext}([a,b])=(-\infty,a)\cup(b,\infty)$ y $\operatorname{Fr}([a,b])=\{a,b\}$.

Proposición 3.3. Dado un conjunto $A \subset \mathbb{R}$, los conjuntos $\operatorname{Int}(A)$, $\operatorname{Ext}(A)$ y $\operatorname{Fr}(A)$ forman una partición de \mathbb{R} , es decir,

- a. Int(A), Ext(A) y Fr(A) son disjuntos entre sí.
- b. $Int(A) \cup Ext(A) \cup Fr(A) = \mathbb{R}$.

i Demostración

Demostración. Se deja como ejercicio.

A continuación se definen otros tipos de puntos que son útiles para definir conceptos que se verán más adelante como el de *límite*.

Definición 3.11 (Punto adherente). Se dice que $a \in \mathbb{R}$ es un *punto adherente* de un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$, si cualquier entorno de a contiene puntos de A.

El conjunto de los puntos adherentes de A se llama adherencia de A y se denota por Adh(A).

Resulta obvio que cualquier punto interior y frontera de un conjunto es también adherente, y que cualquier punto exterior no es adherente. Resulta evidente también que cualquier punto de un conjunto es un punto adherente, de manera que para cualquier conjunto A se tiene $A \subseteq Adh(A)$.

Definición 3.12 (Punto de acumulación). Se dice que $a \in \mathbb{R}$ es un punto de acumulación de un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$, si cualquier entorno reducido de a contiene puntos de A.

El conjunto de los puntos de acumulación de A se llama conjunto derivado de A y se denota por Ac(A).

Advertencia

Resulta obvio de la definición que cualquier punto de acumulación es también un punto de adherencia, es decir, $Ac(A) \subseteq Adh(A)$ para cualquier conjunto $A \subset \mathbb{R}$. Sin embargo no todo punto de adherencia es un punto de acumulación.

Es posible que un conjunto tenga puntos de acumulación que pertenezcan al conjunto y otros que no.

Ejemplo 3.5. Dado el conjunto $A = (0,1) \cup \{2\}$, se tiene que 2 es un punto de adherencia de A, pues para cualquier $\varepsilon > 0$ el entorno $(2 - \varepsilon, 2 + \varepsilon)$ contiene al propio 2 que es un punto de A. Sin embargo, 2 no es un punto de acumulación, porque para $\varepsilon = 0.5$, por ejemplo, el entorno reducido $(2-\varepsilon,2+\varepsilon)$ $\{2\}=(1.5,2)\cup(2,2.5)$ no contiene puntos de A.

En cambio el punto 0.5 es tanto un punto de adherencia como un punto de acumulación de A porque para cualquier $\varepsilon > 0$ el entorno reducido $(0.5 - \varepsilon, 0.5 + \varepsilon)$ $\{0.5\}$ siempre contiene puntos de A. De hecho, para cualquier $x \in (a,b)$ y para cualquier $\varepsilon > 0$, el intervalo $(x-\varepsilon,x+\varepsilon)$ $\{x\}$ contiene puntos de A, y lo mismo ocurre para a y b al ser puntos frontera, de manera que Ac(A) = [0,1], mientras que $Adh(A) = [0,1] \cup \{2\}$.

Intuitivamente, un punto de acumulación de un conjunto A es un punto para el que podemos encontrar puntos de A, distintos de él mismo, tan próximos a él como queramos. Un punto de acumulación se diferencia de un punto de adherencia en que siempre está rodeado por puntos de A, mientras que un punto de adherencia puede estar aislado de los demás puntos de A.

Definición 3.13 (Punto aislado). Se dice que $a \in \mathbb{R}$ es un punto de aislado de un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$, si es un punto adherente de A, pero no de acumulación.

Proposición 3.4. Para cualquier intervalo abierto (a,b) se tiene que Adh((a,b)) =Ac((a,b)) = [a,b].

 $\begin{array}{l} Demostraci\'on. \ \ \text{Todos los puntos de } (a,b) \ \text{son interiores y, por tanto, para cualquier} \\ x \in (a,b), \ \text{existe un } \varepsilon > 0 \ \text{tal que } (x-\varepsilon,x+\varepsilon) \subseteq (a,b). \ \text{Si ahora tomamos cualquier} \\ \text{otro } \varepsilon' > 0, \ \text{se tiene que } (x-\varepsilon',x+\varepsilon') \quad \{x\} \cap (x-\varepsilon,x+\varepsilon) \neq \emptyset, \ \text{pero como} \\ (x-\varepsilon,x+\varepsilon) \subseteq (a,b), \ \text{se concluye que } (x-\varepsilon',x+\varepsilon') \quad \{x\} \cap (a,b) \neq \emptyset, \ \text{por lo que } x \ \text{es un punto de acumulaci\'on de } (a,b). \ \text{Por otro lado, como } a \ y \ b \ \text{son puntos} \\ \text{frontera, tambi\'en se tiene que para cualquier } \varepsilon > 0, \ (a-\varepsilon,a+\varepsilon) \cap (a,b) \neq \emptyset \\ \text{y } (b-\varepsilon,b+\varepsilon) \cap (a,b) \neq \emptyset \ \text{de manera que } [a,b] \subseteq \text{Ac}((a,b)) \subseteq \text{Adh}((a,b)). \ \text{Sea ahora cualquier } x > b, \ \text{y tomemos } \varepsilon = \frac{|x-b|}{2}, \ \text{entonces } (x-\varepsilon,x+\varepsilon) \cap (a,b) = \emptyset, \ \text{de manera que } x \ \text{no es un punto de adherencia de } (a,b). \ \text{Del mismo modo se puede probar que si } x < a, \ \text{entonces } x \ \text{tampoco es un punto de adherencia de } (a,b), \ \text{por lo que } \text{Adh}((a,b)) = [a,b] \ \text{y como } \text{Ac}((a,b)) \subseteq \text{Adh}((a,b)), \ \text{tambi\'en se concluye que } \text{Ac}((a,b)) = [a,b]. \end{array}$

Proposición 3.5. Para cualquier conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$, se tiene que $Adh(A) = A \cup Ac(A)$.

i Demostración

Demostración. Ya se ha visto que $A \subseteq Adh(A)$ y también $Ac(A) \subseteq Adh(A)$, por lo que $A \cup Ac(A) \subseteq Adh(A)$.

Veamos ahora que $\operatorname{Adh}(A) \subseteq A \cup \operatorname{Ac}(A)$. Sea x un punto de adherencia de A. Si $x \in A$ es obvio que $x \in A \cup \operatorname{Ac}(A)$, y si $x \notin A$, entonces $x \in \operatorname{Ac}(A)$, ya que, por ser x punto de adherencia de A, para cualquier $\varepsilon > 0$, $(x - \varepsilon, x + \varepsilon) \cap A \neq \emptyset$, pero como además $x \notin A$, también se cumple que el entorno reducido $(x - \varepsilon, x + \varepsilon)$ $\{x\}$ contiene puntos de A. Así pues, $x \in A \cup \operatorname{Ac}(A)$, y por tanto $\operatorname{Adh}(A) \subseteq A \cup \operatorname{Ac}(A)$.

3.3 Conjuntos abiertos y cerrados

A continuación se generaliza la característica que diferencia los intervalos abiertos y cerrados, a cualquier conjunto.

Definición 3.14 (Conjunto abierto). Se dice que un conjunto $A \subset \mathbb{R}$ es *abierto* cuando para cada $a \in A$ existe un entorno de a contenido en A, es decir, existe $\varepsilon > 0$ tal que $(a - \varepsilon, a + \varepsilon) \subset A$.

Importante

Obsérvese que un conjunto es abierto si todos sus puntos son interiores.

Ejemplo 3.6. Cualquier intervalo abierto (a, b) es un conjunto abierto, ya que según se vio en la Proposición 3.1 Int((a,b)) = (a,b). Por otro lado, un intervalo cerrado [a,b] no es un conjunto abierto pues cualquier entorno de a o b no está contenido en [a,b].

Una colección de conjuntos abiertos se llama topología y cualquier propiedad que pueda definirse en términos de conjuntos abiertos se llama propiedad topológica.

Definición 3.15 (Conjunto cerrado). Se dice que un conjunto $A \subset \mathbb{R}$ es cerrado cuando su complementario $A = \mathbb{R}$ A es abierto.

Ejemplo 3.7. Todo intervalo cerrado [a, b] es cerrado, pues su complementario $(-\infty, a) \cup$ (b, ∞) es abierto.

Advertencia

Un subconjunto puede ser abierto y cerrado a la vez, como por ejemplo \mathbb{R} y \emptyset . \mathbb{R} es abierto ya que todos sus puntos son interiores, y por tanto $\overline{\mathbb{R}}=\emptyset$ es cerrado. Pero, también \emptyset es abierto, ya que para que un conjunto no sea abierto, al menos uno de sus puntos no debe ser interior, y en consecuencia $\emptyset = \mathbb{R}$ es también cerrado. Un subconjunto también puede no ser abierto ni cerrado, como por ejemplo (a, b], ya que b no es un punto interior de (a,b], y a no es un punto interior de (a,b] = $(-\infty, a] \cup (b, \infty)$. Por tanto, no abierto no implica cerrado y no cerrado no implica abierto.

Proposición 3.6. Se cumplen las siquientes propiedades:

- 1. La unión de una colección de conjuntos abiertos es un conjunto abierto.
- 2. La intersección de una colección finita de conjuntos abiertos es un conjunto abierto.
- 3. La intersección de una colección de conjuntos cerrados es cerrada.
- 4. La unión de una colección finita de conjuntos cerrados es un conjunto cerrado.

Demostración. Se deja como ejercicio.

Advertencia

La intersección de una colección infinita de conjuntos abiertos puede no ser un conjunto abierto, como por ejemplo la colección de conjuntos $I_n = (0, 1 + \frac{1}{n}),$ $n \in \mathbb{N}$, ya que $\bigcap_{n=1}^{\infty} I_n = (0, 1]$.

Y la unión de una colección infinita de conjuntos cerrados puede no ser cerrada, como por ejemplo la colección de conjuntos $J_n = [\frac{1}{n}, 1], n \in \mathbb{N}$, ya que $\bigcup_{n=1}^{\infty} J_n =$

Teorema 3.2 (Existencia del máximo y mínimo). Cualquier conjunto no-vacío, cerrado y acotado superiormente tiene un máximo, y cualquier conjunto no-vacío, cerrado y acotado inferiormente tiene un mínimo.

i Demostración

Demostración. Sea A un conjunto no vacío, cerrado y acotado superiormente. Como A está acotado superiormente, por el axioma del supremo, existe $s = \sup(A)$. Probaremos que $s \in A$ por reducción al absurdo. Supongamos que $s \notin A$, entonces $s \in \overline{A}$, y como \overline{A} es abierto al ser A cerrado, existe un $\varepsilon > 0$ tal que $(s - \varepsilon, s + \varepsilon) \subseteq \overline{A}$. Como ningún elemento de A puede ser mayor que s y $(s-\varepsilon,s+\varepsilon) \not\subseteq A$, se tiene que $s - \varepsilon$ es también una cota superior de A, pero $s - \varepsilon < s$, lo que contradice que s sea el supremo de A. Así, pues $s \in A$, y por tanto es el máximo de A.

De manera análoga se prueba que si A un conjunto no vacío, cerrado y acotado inferiormente, A tiene mínimo.

Teorema 3.3 (Bolzano-Weierstrass). Todo subconjunto infinito de \mathbb{R} acotado tiene al menos un punto de acumulación.

i Demostración

Demostración. Para demostrar el teorema construiremos una sucesión de intervalos cerrados y anidados y aplicaremos el Teorema 3.1.

Sea $A \subset \mathbb{R}$ un subconjunto infinito y acotado. Como A está acotado, existe un in-

tervalo cerrado tal que $A\subset I_1=[a_1,b_1]$. Si I_1 se divide en dos intervalos $[a_1,\frac{a_1+b_1}{2}]$ y $[\frac{a_1+b_1}{2},b_1]$, al menos uno de estos intervalos tendrá infinitos puntos de A, ya que de lo contrario A sería finito. Sea $I_2=[a_2,b_2]$ cualquiera de los dos intervalos que tenga infinitos puntos de A. Si I_2 se divide en dos intervalos $[a_2,\frac{a_2+b_2}{2}]$ y $[\frac{a_2+b_2}{2},b_2]$, al menos uno de estos intervalos tendrá infinitos puntos de A, ya que de lo contrario A sería finito. Sea $I_3=[a_3,b_3]$ cualquiera de los dos intervalos que tenga infinitos puntos de A. Siguiendo la misma lógica, se puede construir una sucesión de intervalos anidados $I_1\supset I_2\supset I_3\supset \cdots$, con tamaños $\frac{b_1-a_1}{2^{n-1}}$. Como inf $\{\frac{b_1-a_1}{2^{n-1}}:n\in\mathbb{N}\}=0$, aplicando el Teorema 3.1, existe un único $a\in\mathbb{R}$ tal que $\cap_{n=1}^\infty I_n=\{a\}$.

Veremos ahora que a es un punto de acumulación de A. Para cualquier $\varepsilon>0$, considérese el entorno reducido de a $(a-\varepsilon,a+\varepsilon)$ $\{a\}$. Como $\inf\{\frac{b_1-a_1}{2^{n-1}}:n\in\mathbb{N}\}=0$, existe $m\in\mathbb{N}$ tal que $\frac{b_1-a_1}{2^{m-1}}<\varepsilon$, y por tanto $I_m\subset(a-\varepsilon,a+\varepsilon)$, y como I_m contiene infinitos puntos de A, el entorno reducido a también contiene puntos de A, por lo que a es un punto de acumulación de A.

Teorema 3.4. Cualquier subconjunto de \mathbb{R} es cerrado si y sólo si contiene a todos sus puntos de acumulación.

i Demostración

Demostración. Sea $A \subset \mathbb{R}$ un conjunto cerrado y sea $a \in \mathbb{R}$ un punto de acumulación de A. Veamos por reducción al absurdo que $a \in A$.

Supongamos que $a \notin A$, entonces $a \in \overline{A}$. Como A es cerrado, \overline{A} es abierto y existe un $\varepsilon > 0$ tal que el entorno $(a - \varepsilon, a + \varepsilon) \subset \overline{A}$, pero entonces $(a - \varepsilon, a + \varepsilon) \cap A = \emptyset$, lo que contradice que a sea punto de acumulación de A.

Veremos ahora el otro sentido de la implicación. Sea A un conjunto que contiene todos sus puntos de acumulación. Sea $x \in \overline{A}$, entonces $x \notin A$ y por tanto no es un punto de acumulación de A y existe un $\varepsilon > 0$ tal que el entorno propio de x $(x - \varepsilon, x + \varepsilon)$ $\{x\} \cap A = \emptyset$. Como $(x - \varepsilon, x + \varepsilon)$ $\{x\} \subset \overline{A}$ y $x \in \overline{A}$ se concluye que $(x - \varepsilon, x + \varepsilon) \subset \overline{A}$, de manera que \overline{A} es abierto y A es cerrado.

4 Sucesiones de números reales

Las sucesiones de números reales son claves para comprender el concepto de límite que es fundamental en el Análisis Matemático. En este capítulo se presenta el concepto de sucesión de números reales, el concepto de límite y algunos resultados importantes sobre la convergencia de sucesiones.

4.1 Concepto de sucesión

Definición 4.1 (Sucesión de números reales). Una sucesión de números reales es una aplicación $x: \mathbb{N} \to \mathbb{R}$ que asigna a cada número natural un número real, conocido como término de la sucesión.

Es habitual referirse a una sucesión con la notación $(x_n)_{n=1}^{\infty}$, donde $x_n=x(n)$ con $n\in\mathbb{N}$, o simplemente con x_n .

De manera informal, se puede decir que una sucesión es una lista ordenada de números reales.

Ejemplo 4.1. La sucesión $\left(\frac{1}{n}\right)_{n=1}^{\infty}$ está formada por los términos $\frac{1}{1}, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots$

Precaución

No hay que confundir los términos de una sucesión $(x_n)_{n=1}^{\infty}$, que tienen orden, con el conjunto de los valores de la sucesión $\{x_n:n\in\mathbb{N}\}$ que no tiene orden.

Ejemplo 4.2. La sucesión $((-1)^n)_{n=1}^{\infty}$ está formada por los términos -1,1,-1,1,..., mientras que $\{x_n:n\in\mathbb{N}\}=\{-1,1\}.$

Una sucesión de números reales puede definirse dando una fórmula para el término general, de manera que aplicando la fórmula para cada $n \in \mathbb{N}$ se obtienen todos los términos de las sucesión, o bien de manera recursiva, dando el primer término de la sucesión y después dando una fórmula para construir el siguiente término de la sucesión en función del anterior o anteriores.

Ejemplo 4.3. La sucesión del ejemplo anterior también se puede definir recursivamente de la siguiente manera, $x_1 = -1$ y $x_{n+1} = (-1)x_n \ \forall n \in \mathbb{N}$.

Otro ejemplo es la famosa sucesión de Fibonacci, que se define recursivamente como $x_1=1,\,x_2=1$ y $x_{n+2}=x_n+x_{n+1}$ $\forall n\in\mathbb{N}.$

Las operaciones aritméticas de los números reales se pueden extrapolar a las sucesiones aplicándolas término a término.

Definición 4.2 (Operaciones con sucesiones). Dadas dos sucesiones de números reales $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ e $(y_n)_{n=1}^{\infty}$, se definen las siguientes operaciones:

- Suma: $(x_n)_{n=1}^{\infty} + (y_n)_{n=1}^{\infty} = (x_n + y_n)_{n=1}^{\infty}$.
- Diferencia: $(x_n)_{n=1}^{\infty} (y_n)_{n=1}^{\infty} = (x_n y_n)_{n=1}^{\infty}$.
- Producto: $(x_n)_{n=1}^{\infty}(y_n)_{n=1}^{\infty} = (x_n y_n)_{n=1}^{\infty}$.
- $\bullet \ \ \textit{División:} \ \frac{(x_n)_{n=1}^{\infty}}{(y_n)_{n=1}^{\infty}} = \left(\frac{x_n}{y_n}\right)_{n=1}^{\infty}, \, \text{siempre y cuando} \ y_n \neq 0 \,\, \forall n \in \mathbb{N}.$
- Producto por escalar: $c(x_n)_{n=1}^{\infty} = (cx_n)_{n=1}^{\infty}$.

Ejemplo 4.4. Dadas las sucesiones $(n)_{n=1}^{\infty}$ y $((-1)^n)_{n=1}^{\infty}$ se tiene:

$$(n)_{n=1}^{\infty} + ((-1)^n)_{n=1}^{\infty} = (n + (-1)^n)_{n=1}^{\infty} = (0, 3, 2, 5, 4, \dots)$$
$$(n)_{n-1}^{\infty} ((-1)^n)_{n-1}^{\infty} = (n(-1)^n)_{n-1}^{\infty} = (-1, 2, -3, 4, -5, \dots)$$

4.2 Límite de una sucesión

Definición 4.3 (Límite de una sucesión). Dada una sucesión $(x_n)_{n=1}^{\infty}$, se dice que un número $x \in \mathbb{R}$ es el *límite de la sucesión*, si para cada $\varepsilon > 0$ existe un $k \in \mathbb{N}$ a partir del cuál todos los términos de la sucesión caen en el entorno $(x - \varepsilon, x + \varepsilon)$, es decir, $|x_n - x| < \varepsilon \ \forall n \ge k$.

Si x es el límite de la sucesión, se dice que la suceción converge a x, y se denota $\lim_{n\to\infty}x_n=x$.

Si una sucesión tiene límite se dice que es *convergente*, y en caso contrario se dice que es *divergente*.

De manera informal podemos decir que una sucesión de números reales converge a un número x, si para cualquier entorno suyo, a partir de un determinado término, todos los siguientes caen dentro del entorno, tal y como se muestra en la siguiente figura.

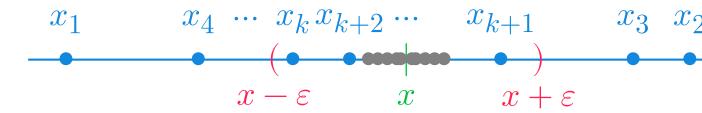


Figura 4.1: Límite de una sucesión

Esto es equivalente a decir que podemos encontrar términos de la sucesión tan cerca de x como queramos.

Ejemplo 4.5. La sucesión $(\frac{1}{n})_{n=1}^{\infty}$ es convergente y $\lim_{n\to\infty}\frac{1}{n}=0$, ya que para cualquier $\varepsilon>0$, por la Teorema 2.3, se tiene que existe un $k\in\mathbb{N}$, tal que $\frac{1}{k}<\varepsilon$, de manera que para cualquier n>k, se tiene $|\frac{1}{n}-0|=\frac{1}{n}<\frac{1}{k}<\varepsilon$.

Sin embargo, la sucesión $(n)_{n=1}^{\infty}$ diverge.

Teorema 4.1. Una sucesión de números reales puede tener a lo sumo un límite.

Demostración. Lo probaremos por reducción al absurdo. Supongamos que $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ converge a x e y con $x \neq y$. Entonces existe un $\varepsilon > 0$ tal que los entornos $(x-\varepsilon, x+\varepsilon)$ e $(y-\varepsilon, y+\varepsilon)$ son disjuntos. Ahora bien, por ser $\lim_{n\to\infty} x_n = x$ existe un $k_1 \in \mathbb{N}$ tal que $x_n \in (x-\varepsilon, x+\varepsilon) \ \forall n \geq k_1$, y por ser $\lim_{n\to\infty} y_n = y$ existe un $k_2 \in \mathbb{N}$ tal que $x_n \in (y-\varepsilon, y+\varepsilon) \ \forall n \geq k_2$. Basta tomar $k=\max(k_1,k_2)$ para ver que x_k pertenece a ambos entornos, lo cual contradice que sean disjuntos. Por tanto, debe ser x=y.

Definición 4.4 (Cola de una sucesión). Dada una sucesión de números reales $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ y $m \in \mathbb{N}$, se define la *cola* m de la sucesión, como la sucesión $(x_{m+n})_{n=1}^{\infty} = (x_{m+1}, x_{m+2}, ...)$.

П

Proposición 4.1. Dada una sucesión de números reales $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ y $m \in \mathbb{N}$, la cola $(x_{m+n})_{n=1}^{\infty}$ converge si y solo si $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ converge, y en tal caso, $\lim_{n\to\infty} x_n = \lim_{n\to\infty} x_{m+n}$.

i Demostración

 $\begin{array}{l} \textit{Demostraci\'on.} \text{ Supongamos que la cola } (x_{m+n})_{n=1}^{\infty} \text{ converge a } x. \text{ Entonces, para cada } \varepsilon > 0, \text{ existe un } k_1 \in \mathbb{N} \text{ tal que } |x_{m+n} - x| < \varepsilon \ \forall n \geq k_1. \text{ Tomando ahora } k = k_1 + m \in \mathbb{N} \text{ se tiene que para cualquier } l \geq k \ |x_l - x| = |x_{l-m+m} - x| = |x_{m+n} - x| < \varepsilon \text{ siendo } n = l - m, \text{ ya que } l \geq k_1 + m \text{ y } l - m \geq k_1. \text{ Por tanto, } (x_n)_{n=1}^{\infty} \text{ converge a } x. \end{array}$

Para probar la otra implicación, supongamos ahora que $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ converge a x. Entonces, para cada $\varepsilon > 0$, existe un $k \in \mathbb{N}$ tal que $|x_n - x| < \varepsilon \ \forall n \geq k$. Pero como $m \in \mathbb{N}$, si $n \geq k$ también $m + n \geq k$, con lo que $|x_{m+n} - x| < \varepsilon$, y por consiguiente, $(x_{m+n})_{n=1}^{\infty}$ converge a x.

Proposición 4.2. Sean $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ y $(y_n)_{n=1}^{\infty}$ dos sucesiones de números reales tales que $(y_n)_{n=1}^{\infty}$ converge a 0. Si existe $x, c \in \mathbb{R}$ con c > 0 tal que $|x_n - x| < c|y_n| \ \forall n \in \mathbb{N}$, entonces $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ converge a x.

Demostraci'on. Dado $\varepsilon>0,$ sea $\varepsilon'=\frac{\varepsilon}{c}>0.$ Como $(y_n)_{n=1}^\infty$ converge a 0, existe $k\in\mathbb{N}$ tal que $|y_n-0|=|y_n|<\varepsilon'$ $\forall n\geq k.$ Así pues, $\forall n\geq k$ se tiene que $|x_n-x|< c|y_n|< c\varepsilon'=c\frac{\varepsilon}{c}=\varepsilon,$ por lo que $(x_n)_{n=1}^\infty$ converge a x.

Ejemplo 4.6. Veamos que la sucesión $\left(\frac{1}{2^n}\right)_{n=1}^{\infty}$ converge a 0. Para cualquier $n \in \mathbb{N}$ se cumple que $0 < n < 2^n$, de donde se deduce $0 < \frac{1}{2^n} < \frac{1}{n}$, lo que equivale a $|\frac{1}{2^n} - 0| < \frac{1}{n}$. Así pues, aplicando el teorema anterior, se concluye que $\lim_{n \to \infty} \frac{1}{2^n} = 0$.

Veamos ahora que $\lim_{n\to\infty} n^{1/n}=1$. Para cualquier $n\in\mathbb{N}$, con n>1, se cumple que $n^{1/n}>1$, de manera que se puede escribir $n^{1/n}=1+k_n$, donde $k_n=n^{1/n}-1$. Aplicando ahora el teorema del binomio, se tiene que $0< k_n<\sqrt{2/n} \ \forall n\in\mathbb{N}$. Por tanto, $|n^{1/n}-1|=k_n<\sqrt{2/n}=\sqrt{2}\frac{1}{\sqrt{n}}$, y como $\sqrt{2}>0$ y $\lim_{n\to\infty}\frac{1}{\sqrt{n}}=0$, por el teorema anterior se tiene que $\lim_{n\to\infty}n^{1/n}=1$.

Definición 4.5 (Sucesión acotada). Se dice que una sucesión de números reales $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ está acotada si existe c > 0 tal que $|x_n| \le c \ \forall n \in \mathbb{N}$.

Teorema 4.2. Toda sucesión de números reales convergente está acotada.

i Demostración

Demostración. Sea $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ una sucesión convergente a x. Entonces, si tomamos $\varepsilon=1$ existe un $k\in\mathbb{N}$ tal que $|x_n-x|<1$ $\forall n\geq k$.

Por la desigual dad triangular (Proposición 2.4) se tiene que $|x_n|=|x_n-x+x|\leq |x_n-x|+|x|<1+|x|,$ de donde se deduce que $|x_n|<|x|+1$ $\forall n\geq k.$ Si se toma $c=\max\{|x_1|,\dots,|x_{k-1}|,|x|+1\}$ se tiene que si n< k entonces $|x_n|\leq c$ y si $n\geq k$ entonces $|x_n|<|x|+1\leq c,$ de modo que $\forall n\in\mathbb{N}\ |x_n|\leq c,$ por lo que $(x_n)_{n=1}^\infty$ está acotada.

Ejemplo 4.7. La sucesión $(n)_{n=1}^{\infty}$ diverge ya que no está acotada. Si estuviese acotada existiría un c > 0 tal que $|n| \le c \ \forall n \in \mathbb{N}$, lo que infringe la propiedad arquimediana.

Precaución

El otro sentido de la implicación no se cumple, es decir, no toda sucesión acotada es convergente. Por ejemplo, la sucesión $((-1)^n)_{n=1}^{\infty}$.

Proposición 4.3. Sean $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ y $(y_n)_{n=1}^{\infty}$ dos sucesiones de números reales tales que $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ converge a x e $(y_n)_{n=1}^{\infty}$ converge a y. Entonces se cumple:

- a. $(x_n)_{n=1}^{\infty} + (y_n)_{n=1}^{\infty}$ converge $a \times y$.
- b. $(x_n)_{n=1}^{\infty} (y_n)_{n=1}^{\infty}$ converge $a \ x y$.
- c. $(x_n)_{n=1}^{\infty} (y_n)_{n=1}^{\infty}$ converge a xy.
- d. $c(x_n)_{n=1}^{\infty}$ converge a cx.
- e. Si $y_n \neq 0 \ \forall n \in \mathbb{N} \ e \ y \neq 0, \ \frac{(x_n)_{n=1}^\infty}{(y_n)_{n=1}^\infty} \ converge \ a \ \frac{x}{y}.$

i Demostración

Demostración. Veamos la prueba de cada apartado.

a. Dado $\varepsilon>0$, sea $\varepsilon'=\frac{\varepsilon}{2}>0$. Por ser $\lim_{n\to\infty}x_n=x$ existe $k_1\in\mathbb{N}$ tal que $|x_n-x|<\varepsilon'=\frac{\varepsilon}{2}\ \forall n\geq k_1$, y por ser $\lim_{n\to\infty}y_n=x$ existe $k_2\in\mathbb{N}$ tal que $|y_n-y|<\varepsilon'=\frac{\varepsilon}{2}\ \forall n\geq k_2$.

Tomando $k = \max(\{k_1, k_2\})$, para $n \ge k$, aplicando la desigualdad triangular, se tiene que

$$\begin{split} |(x_n+y_n)-(x+y)| &= |(x_n-x)+(y_n-y)| \\ &\leq |x_n-x|+|y_n-y| \\ &< \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon. \end{split}$$

Por tanto, $\lim_{n\to\infty} x_n + y_n = x + y$.

- b. Se prueba de manera análoga.
- c. Dado $\varepsilon>0$, sea $\varepsilon_1=\frac{\varepsilon}{2|x|}>0$. Por ser $\lim_{n\to\infty}y_n=x$ existe $k_1\in\mathbb{N}$ tal que $|y_n-y|<\varepsilon_1=\frac{\varepsilon}{2}\;\forall n\geq k_1$. Y por el teorema anterior, como $(y_n)_{n=1}^\infty$ converge, está acotada, de modo que existe una cota c>0 tal que $|y_n|\leq c\;\forall n\in\mathbb{N}$.

Sea ahora $\varepsilon_2=\frac{\varepsilon}{2c}>0$. Por ser $\lim_{n\to\infty}x_n=x$ existe $k_2\in\mathbb{N}$ tal que $|x_n-x|<\varepsilon_2=\frac{\varepsilon}{2}\;\forall n\geq k_2$.

Tomando ahora Tomando $k = \max(\{k_1, k_2\})$, para $n \geq k$, aplicando la desigualdad triangular, se tiene que

$$\begin{split} |(x_ny_n)-(xy)| &= |(x_ny_n-xy_n)+(xy_n-xy)|\\ &\leq |(x_ny_n-xy_n)|+|(xy_n-xy)|\\ &= |(x_n-x)y_n|+|x(y_n-y)|\\ &= |(x_n-x)||y_n|+|x||(y_n-y)|\\ &< |(x_n-x)|c+|x||(y_n-y)|\\ &< c\varepsilon_2+|x|\varepsilon_1=\frac{\varepsilon}{2c}c+|x|\frac{\varepsilon}{2|x|}\\ &=\frac{\varepsilon}{2}+\frac{\varepsilon}{2}=\varepsilon. \end{split}$$

Por tanto, $\lim_{n\to\infty} x_n y_n = xy$.

- d. Se prueba a partir del resultado anterior, tomando la sucesión constante $(c)_{n=1}^{\infty}$.
- e. Se deja como ejercicio.

Ejemplo 4.8. Veamos que la sucesión $\left(\frac{2n+1}{n+3}\right)_{n=1}^{\infty}$ converge a 2.

$$\begin{split} \lim_{n \to \infty} \frac{2n+1}{n+3} &= \lim_{n \to \infty} \frac{2+\frac{1}{n}}{1+\frac{3}{n}} = \frac{\lim_{n \to \infty} 2+\frac{1}{n}}{\lim_{n \to \infty} 1+\frac{3}{n}} = \\ &= \frac{\lim_{n \to \infty} 2+\lim_{n \to \infty} \frac{1}{n}}{\lim_{n \to \infty} 1+\lim_{n \to \infty} \frac{3}{n}} = \frac{2+0}{1+0} = 2. \end{split}$$

Teorema 4.3 (Compresión de sucesiones convergentes). Dadas tres sucesiones de números reales $(x_n)_{n=1}^\infty$, $(y_n)_{n=1}^\infty$ y $(z_n)_{n=1}^\infty$, tales que $x_n \leq y_n \leq z_n \ \forall n \in \mathbb{N}$, si $(x_n)_{n=1}^\infty$ y $(z_n)_{n=1}^\infty$ convergen a x, entonces $(y_n)_{n=1}^\infty$ converge a x.

 $\begin{array}{ll} \textit{Demostraci\'on.} \text{ Supongamos que } \lim_{n \to \infty} x_n = \lim_{n \to \infty} z_n = x \text{ y sea } \varepsilon > 0. \text{ Si tomamos } \varepsilon_1 = \frac{\varepsilon}{4} > 0, \text{ como } (z_n)_{n=1}^\infty \text{ converge a } x, \text{ existe } k_1 \in \mathbb{N} \text{ tal que } |z_n - x| < \varepsilon_1 \\ \forall n \geq k_1. \text{ Y si tomamos } \varepsilon_2 = \frac{\varepsilon}{2} > 0, \text{ como } (x_n)_{n=1}^\infty \text{ converge a } x, \text{ existe } k_2 \in \mathbb{N} \text{ tal que } |x_n - x| < \varepsilon_2 \ \forall n \geq k_2. \text{ Entonces, si se toma } k = \max(k_1, k_2), \text{ se cumple que para cualquier } n \geq k, \end{array}$

$$\begin{split} |y_n - x| &= |y_n - z_n + z_n - x| \\ &\leq |y_n - z_n| + |z_n - x| & \text{(prop.2.4 (f))} \\ &= z_n - y_n + |z_n - x| \\ &\leq z_n - x_n + |z_n - x| \\ &= |z_n - x_n| + |z_n - x| \\ &= |z_n - x + x - x_n| + |z_n - x| \\ &\leq |z_n - x| + |x - x_n| + |z_n - x| \\ &\leq |z_n - x| + |x - x_n| & \text{(prop.2.4 (f))} \\ &= 2|z_n - x| + |x_n - x| & \text{(prop.2.4 (b))} \\ &< 2\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 2\frac{\varepsilon}{4} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon. \end{split}$$

Por tanto, $\lim_{n\to\infty} y_n = x$.

Ejemplo 4.9. Veamos que la sucesión $\left(\frac{2n}{n^2+1}\right)_{n=1}^{\infty}$ converge a 0. Para ello basta con verque

$$0 \leq \frac{2n}{n^2 + 1} \leq \frac{2n}{n^2} \leq \frac{2}{n} \ \forall n \in \mathbb{N}$$

y que $\lim_{n\to\infty}\frac{2}{n}=\lim_{n\to\infty}0=0$, de manera que aplicando el teorema anterior de compresión se tiene que $\lim_{n\to\infty}\frac{2n}{n^2+1}=0$.

Veamos ahora que la sucesión $\left(\frac{\operatorname{sen}(n)}{n}\right)_{n=1}^{\infty}$ también converge a 0. De nuevo basta con ver que, como $-1 \leq \operatorname{sen}(n) \leq 1 \ \forall n \in \mathbb{N}$,

$$\frac{-1}{n} \le \frac{\operatorname{sen}(n)}{n} \le \frac{1}{n} \ \forall n \in \mathbb{N}$$

y que $\lim_{n\to\infty}\frac{-1}{n}=\lim_{n\to\infty}\frac{1}{n}=0$, de manera que aplicando el teorema anterior de compresión se tiene que $\lim_{n\to\infty}\frac{\sin(n)}{n}=0$.

Proposición 4.4 (Criterio del cociente). Si $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ es una sucesión de números reales estrictamente positivos tal que la sucesión $\left(\frac{x_{n+1}}{x_n}\right)_{n=1}^{\infty}$ converge a x < 1, entonces $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ converge a θ .

i Demostración

Demostraci'on. Sea y tal que x < y < 1 y tomemos $\varepsilon = y - x > 0.$ Como $\lim_{n \to \infty} \frac{x_{n+1}}{x_n} = x,$ existe un $k \in \mathbb{N}$ tal que $|\frac{x_{n+1}}{x_n} - x| \leq \varepsilon \ \forall n \geq k,$ y por tanto, se tiene que para cualquier $n \geq k,$

$$\begin{split} \left| \frac{x_{n+1}}{x_n} - x \right| &\leq \varepsilon \Rightarrow -\varepsilon < \frac{x_{n+1}}{x_n} - x \leq \varepsilon \\ &\Rightarrow \frac{x_{n+1}}{x_n} \leq x + \varepsilon = x + y - x = y \\ &\Rightarrow x_{n+1} < yx_n. \end{split}$$

Por consiguiente, si $m \in \mathbb{N}$ se cumple que $x_{k+m} < yx_{k+m-1} < y^2x_{k+m-2} < \cdots < y^mx_k$, de manera que $0 < x_{k+m} < y^mx_k \ \forall m \in \mathbb{N}$. Como y < 1, $\lim_{m \to \infty} y^m = 0$ y $\lim_{m \to \infty} y^mx_k = 0$, y por el teorema de compresión (Teorema 4.3) $\lim_{m \to \infty} x_{k+m} = 0$. Finalmente, como $(x_{k+m})_{m=1}^{\infty}$ es una cola de la sucesión $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ se tiene que $\lim_{n \to \infty} x_n = 0$.

Ejemplo 4.10. Veamos que la sucesión $\left(\frac{n}{2^n}\right)_{n=1}^{\infty}$ converge a 0.

$$\begin{split} \lim_{n \to \infty} \frac{x_{n+1}}{x_n} &= \lim_{n \to \infty} \frac{\frac{n+1}{2^{n+1}}}{\frac{n}{2^n}} = \lim_{n \to \infty} \frac{1}{2} \frac{n+1}{n} \\ &= \lim_{n \to \infty} \frac{1}{2} \left(\frac{1}{n} + 1 \right) = \lim_{n \to \infty} \frac{1}{2} + \frac{1}{2n} \\ &= \lim_{n \to \infty} \frac{1}{2} + \lim_{n \to \infty} \frac{1}{2n} = \frac{1}{2} < 1. \end{split}$$

Así pues, por la proposición anterior, $\lim_{n\to\infty} \frac{n}{2^n} = 0$.

4.3 Sucesiones monótonas

Veremos a continuación un tipo particular de sucesiones, cuyos términos siempre crecen o decrecen. Estas sucesiones son de especial importancia en aplicaciones del Análisis Matemático.

Definición 4.6 (Sucesión monónota). Dada una sucesión de números reales $(x_n)_{n=1}^{\infty}$:

- Se dice que es una sucesión creciente, si $x_n \leq x_{n+1} \ \forall n \in \mathbb{N}$, y se dice que es estrictamente creciente si $x_n < x_{n+1} \ \forall n \in \mathbb{N}$.
- Se dice que es una sucesión decreciente, si $x_n \geq x_{n+1} \ \forall n \in \mathbb{N}$, y se dice que es estrictamente decreciente si $x_n > x_{n+1} \ \forall n \in \mathbb{N}$.
- Se dice que es una sucesión monótona, si es creciente o decreciente.

Ejemplo 4.11. Las sucesiones $(2n)_{n=1}^{\infty}$ y $(n^2)_{n=1}^{\infty}$ son estrictamente crecientes y la sucesión $\left(\frac{1}{n}\right)_{n=1}^{\infty}$ es estrictamente decreciente.

La sucesión $(a^n)_{n=1}^{\infty}$ es estrictamente creciente si a>1 y estrictamente decreciente si 0 < a < 1. Si a=1 la sucesión es, a la vez, creciente y decreciente, ya que en realidad es constante.

Sin embargo, la sucesión $((-2)^n)_{n=1}^{\infty}$ no es monótona.

Teorema 4.4 (Convergencia de una sucesión monótona). Una sucesión de números reales monótona $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ converge si y solo si está acotada. Además se cumple que:

- $Si(x_n)_{n=1}^{\infty}$ es una sucesión creciente y acotada, entonces $\lim_{n\to\infty} x_n = \sup(\{x_n : n \in \mathbb{N}\}).$
- $Si(x_n)_{n=1}^{\infty}$ es una sucesión decreciente y acotada, entonces $\lim_{n\to\infty}x_n=\inf(\{x_n:n\in\mathbb{N}\})$.

i Demostración

Demostración. Por el Teorema 4.2 ya se vio que toda sucesión convergente está acotada. Veamos ahora que si $(x_n)_{n=1}^\infty$ es una sucesión monótona acotada, entonces converge.

Sea $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ una sucesión creciente y acotada, entonces el conjunto de los términos de la sucesión $A = \{x_n : n \in \mathbb{N}\}$ no está vacío y está acotado, y por el axioma del

supremo, existe $s=\sup(A)$. Para ver que $(x_n)_{n=1}^\infty$ converge a s, tomemos cualquier $\varepsilon>0$. Como s es el supremo de A, $s-\varepsilon$ no es cota superior de A de manera que existe $k\in\mathbb{N}$ tal que $x_k>s-\varepsilon$. Si tomamos ahora cualquier $n\geq k$, por ser la sucesión monótona, se tiene que $x_k\leq x_n$, y al mismo tiempo $x_n< s$ por ser s una cota superior de la sucesión. Por tanto, para cualquier $n\geq k$ se cumple

$$s - \varepsilon \le x_k \le x_n \le s < s + \varepsilon \Rightarrow -\varepsilon < x_n - s < \varepsilon \Rightarrow |x_n - s| < \varepsilon,$$

lo que prueba que $\lim_{n\to\infty} x_n = s$.

De forma similar se puede probar que si $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ una sucesión decreciente y acotada, entonces $\lim_{n\to\infty}x_n=\inf(\{x_n:n\in\mathbb{N}\})$.

Ejemplo 4.12. Veamos que la sucesión $\left(\frac{1}{\sqrt{n}}\right)_{n=1}^{\infty}$ converge a 0. La sucesión es decreciente ya que para cualquier $n \in \mathbb{N}$ se tiene que $n < n+1 \Rightarrow \sqrt{n} < \sqrt{n+1} \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{n}} > \frac{1}{\sqrt{n+1}}$. Como además está acotada inferiormente por el 0, se tiene que $\lim_{n\to\infty}\frac{1}{\sqrt{n}}=\inf\left(\left\{\frac{1}{\sqrt{n}}:n\in\mathbb{N}\right\}\right)=0$.

Ejemplo 4.13. Sea la sucesion definida recursivamente de la siguiente manera: $x_1 = 1$ y $x_{n+1} = \sqrt{2x_n}$. Veamos que converge a 2.

En primer lugar, veremos que es una sucesión creciente por inducción. Para n=1 se tiene que $x_1=1<\sqrt{2}=x_2$. Supongamos ahora que $x_n< x_{n+1}$. Entonces, $x_{n+2}=\sqrt{2x_{n+1}}>\sqrt{2x_n}=x_{n+1}$, de manera que la sucesión es creciente.

En segundo lugar, veremos, también por inducción, que $x_n \leq 2 \ \forall n \in \mathbb{N}$. Para n=1 se tiene que $x_1=1<2$. Supongamos ahora que $x_n<2$. Entonces, $x_{n+1}=\sqrt{2x_n}=\sqrt{2}\sqrt{x_n}<\sqrt{2}\sqrt{2}=2$. Luego, la sucesión está acotada, y por el teorema anterior, converge. Para calcular el límite, aprovechando la definición recursiva de la sucesión, se tiene

$$\begin{split} x &= \lim_{n \to \infty} x_n = \lim_{n \to \infty} x_{n+1} = \lim_{n \to \infty} \sqrt{2x_n} = \lim_{n \to \infty} \sqrt{2} \sqrt{x_n} \\ &= \lim_{n \to \infty} \sqrt{2} \lim_{n \to \infty} \sqrt{x_n} = \sqrt{2} \sqrt{x} = \sqrt{2x}. \end{split}$$

Así pues, se tiene que

$$x=\sqrt{2x} \Rightarrow x^2=2x \Rightarrow x^2-2x=0 \Rightarrow x(x-2)=0,$$

de donde se deduce, resolviendo la ecuación, que x=0 o x=1. Como x=0 es imposible pues $x_n \geq 1 \ \forall n \in \mathbb{N}$, se concluye que x=2, y por tanto, $\lim_{n \to \infty} x_n = 2$.

Ejemplo 4.14. Veamos ahora que la sucesión $\left(\left(1+\frac{1}{n}\right)^n\right)_{n=1}^{\infty}$ es convergente. Sea $x_n=\left(1+\frac{1}{n}\right)^n$, entonces por el desarrollo del binomio, se tiene

$$\begin{split} x_n &= \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n \\ &= \binom{n}{0} 1^n \left(\frac{1}{n}\right)^0 + \binom{n}{1} 1^{n-1} \left(\frac{1}{n}\right)^1 + \binom{n}{2} 1^{n-2} \left(\frac{1}{n}\right)^2 + \dots + \binom{n}{n} 1^0 \left(\frac{1}{n}\right)^n \\ &= \binom{n}{0} 1 + \binom{n}{1} \frac{1}{n} + \binom{n}{2} \frac{1}{n^2} + \binom{n}{3} \frac{1}{n^3} + \dots + \binom{n}{n} \frac{1}{n^n} \\ &= 1 + n \frac{1}{n} + \frac{n(n-1)}{2!} \frac{1}{n^2} + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!} \frac{1}{n^3} + \dots + \frac{n!}{n!} \frac{1}{n^n} \\ &= 1 + 1 + \frac{1}{2!} \left(1 - \frac{1}{n}\right) + \frac{1}{3!} \left(1 - \frac{1}{n}\right) \left(1 - \frac{2}{n}\right) + \dots + \frac{1}{n!} \left(1 - \frac{1}{n}\right) \dots \left(1 - \frac{n-1}{n}\right). \end{split}$$

у

$$\begin{split} x_{n+1} &= \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1} \\ &= 1 + 1 + \frac{1}{2!} \left(1 - \frac{1}{n+1}\right) + \frac{1}{3!} \left(1 - \frac{1}{n+1}\right) \left(1 - \frac{2}{n+1}\right) + \cdots \\ &+ \frac{1}{n!} \left(1 - \frac{1}{n+1}\right) \cdots \left(1 - \frac{n-1}{n+1}\right) + \frac{1}{(n+1)!} \left(1 - \frac{1}{n+1}\right) \cdots \left(1 - \frac{n}{n+1}\right). \end{split}$$

Como se puede observar, el desarrollo de x_n tiene n+1 términos, mientras que el de x_{n+1} tiene n+2 términos. Además, cada uno de los términos que aparece en x_n es menor o igual que el termino correspondiente de x_{n+1} , de modo que se puede concluir que $x_n < x_{n+1} \ \forall n \in \mathbb{N}$, y la sucesión es creciente.

Por otro lado, como se cumple que $\left(1-\frac{k}{n}\right)<1 \ \forall k=1,\ldots,n,$ entonces

$$\begin{split} x_n &= 1 + 1 + \frac{1}{2!} \left(1 - \frac{1}{n} \right) + \frac{1}{3!} \left(1 - \frac{1}{n} \right) \left(1 - \frac{2}{n} \right) + \dots + \frac{1}{n!} \left(1 - \frac{1}{n} \right) \dots \left(1 - \frac{n-1}{n} \right) \\ &< 1 + 1 + \frac{1}{2!} + \frac{1}{3!} + \dots + \frac{1}{n!} \end{split}$$

y como $2^{n-1} \le n! \ \forall n \in \mathbb{N}$, finalmente se tiene

$$x_n < 1 + 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2^2} + \dots + \frac{1}{2^{n-1}} = 2 + \frac{\frac{1}{2^{n-1}} \frac{1}{2} - \frac{1}{2}}{\frac{1}{2} - 1} = 2 + 1 - \frac{1}{2^{n-1}} < 3.$$

Así pues, $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ es creciente y está acotada, de manera que por el teorema anterior, es convergente, y como además $2 < x_n < 3 \ \forall n \in \mathbb{N}$, su límite es un número entre 2 y 3. A este número se le llama $e = \lim_{n \to \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$, que es un número irracional.

4.4 Subsucesiones

Definición 4.7 (Subsucesión). Se dice que una sucesión de números reales $(y_n)_{n=1}^{\infty}$ es una subsucesión de otra sucesión $(x_n)_{n=1}^{\infty}$, si existe una sucesión estrictamente creciente de números naturales $(r_n)_{n=1}^{\infty}$, tal que $y_n = x_{r_n} \ \forall n \in \mathbb{N}$.

Ejemplo 4.15. La sucesión $(y_n)_{n=1}^{\infty} = \left(\frac{1}{2n}\right)_{n=1}^{\infty}$ es una subsucesión de la sucesión $(x_n)_{n=1}^{\infty} = \left(\frac{1}{n}\right)_{n=1}^{\infty}$, ya que tomando $(r_n)_{n=1}^{\infty} = 2n$, se cumple que $y_n = x_{r_n} \ \forall n \in \mathbb{N}$.

Del mismo modo, las sucesiones $\left(\frac{1}{2^n}\right)_{n=1}^{\infty}$ y $\left(\frac{1}{n!}\right)_{n=1}^{\infty}$ también son subsucesiones de $\left(\frac{1}{n}\right)_{n=1}^{\infty}$.

Teorema 4.5 (Convergencia de las subsucesiones). Si una sucesión de números reales converge a x entonces cualquier subsucesión suya converge también a x.

i Demostración

 $\begin{array}{l} \textit{Demostraci\'on.} \text{ Sea } (x_{r_n})_{n=1}^{\infty} \text{ una subsucesi\'on de } (x_n)_{n=1}^{\infty}. \text{ Como } (x_n)_{n=1}^{\infty} \text{ converge a } x, \text{ dado cualquier } \varepsilon > 0, \text{ existe } k \in \mathbb{N} \text{ tal que } |x_n - x| < \varepsilon \ \forall n \geq k. \\ \text{Como } (r_n)_{n=1}^{\infty} \text{ es estrictamente creciente, } r_n \geq n \ \forall n \in \mathbb{N}, \text{ de manera que si } n \geq k, \\ \text{entonces } r_n \geq n \geq k, \text{ y por tanto, } |x_{r_n} - x| < \varepsilon, \text{ por lo que } (x_{r_n})_{n=1}^{\infty} \text{ converge a } x. \end{array}$

Ejemplo 4.16. Veamos que la sucesión $(a^n)_{n=1}^{\infty}$ converge a 0 cuando 0 < a < 1.

La sucesión es decreciente ya que $x_{n+1} = a^{n+1} = a^n a < a^n = x_n \ \forall n \in \mathbb{N}$ al ser 0 < a < 1, y también está acotada ya que $0 < a^n < 1 \ \forall n \in \mathbb{N}$, de manera que por el teorema de la convergencia de una sucesión monótona, se tiene que $(a^n)_{n=1}^{\infty}$ converge a un número x.

Para averiguar el límite, como cualquier subsucesión suya también converge a x por el teorema anterior, en particular $(a^{2n})_{n=1}^{\infty}$ converge a x, por lo que se tiene

$$x = \lim_{n \to \infty} a^n = \lim_{n \to \infty} a^{2n} = \lim_{n \to \infty} (a^n)^2 = x^2.$$

Así pues, $x^2 = x$, de manera que, resolviendo la ecuación, x = 0 o x = 1. Como $(a^n)_{n=1}^{\infty}$ es decreciente y $0 < a^n < 1 \ \forall n \in \mathbb{N}$, tiene que ser x = 0.

Del teorema anterior se deduce que si una sucesión tiene dos subsucesiones que convergen a distintos límites, o una subsucesión que diverge, entonces dicha sucesión diverge.

Ejemplo 4.17. La sucesión $((-1)^n)_{n=1}^{\infty}$ diverge pues la subsucesión $((-1)^{2n})_{n=1}^{\infty}$ converge a 1 y la subsucesión $((-1)^{2n+1})_{n=1}^{\infty}$ converge a -1.

Teorema 4.6 (Bolzano-Weierstrass). Toda sucesión de números reales acotada tiene al menos una subsucesión convergente.

Demostración

Demostración. Sea $(x_n)_{n=1}^\infty$ una sucesión de números reales acotada. Entonces, $A=\{x_n:n\in\mathbb{N}\}$ es un conjunto acotado.

Si A es finito, existe un $c \in A$ y un $k \in \mathbb{N}$ tal que $x_n = c \ \forall n \geq k$, de manera que la subsucesión $x_{n+k} = c \ \forall n \in \mathbb{N}$, y al ser constante, converge a c.

Si A es infinito, como está acotado, por el Teorema 3.3, existe un $x \in \mathbb{R}$ que es punto de acumulación de A. Entonces, para cada $n \in \mathbb{N}$, el conjunto $A_n = (x - \frac{1}{n}, x + \frac{1}{n}) \cap A \neq \emptyset$, y de hecho es infinito. Tomando como r_1 el primer número natural tal que $x_{r_1} \in A_n$, r_2 el primer número natural tal que $r_2 > r_1$ y $x_{r_2} \in A_2$, y así sucesivamente, se puede construir una sucesión de números naturales $(r_n)_{n=1}^{\infty}$ estrictamente creciente, de manera que $(x_{r_n})_{n=1}^{\infty}$ es una subsucesión de $(x_n)_{n=1}^{\infty}$. Además, como $x_{r_n} \in A_n$, se tiene que $|x_{r_n} - x| < \frac{1}{n} \ \forall n \in \mathbb{N}$, de manera que $(x_{r_n})_{n=1}^{\infty}$ converge a x.

Teorema 4.7. Cualquier conjunto de número reales $A \subseteq \mathbb{R}$ es cerrado si y solo si toda sucesión de números reales en A que converge, lo hace a un número de A.

i Demostración

Demostración. Supongamos que A es un conjunto cerrado y sea $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ una sucesión de números reales en A tal que $\lim_{n\to\infty}x_n=x$. Veremos que $x\in A$ por reducción al absurdo. Para ello, supongamos que $x\notin A$. Entonces $x\in \overline{A}$. Como A es cerrado, \overline{A} es abierto, y entonces, existe $\varepsilon>0$ tal que $(x-\varepsilon,x+\varepsilon)\subset \overline{A}$. Por otro lado, como $\lim_{n\to\infty}x_n=x$, existe $k\in\mathbb{N}$ tal que $\forall n\geq k$ se tiene $|x_n-x|<\varepsilon\Rightarrow x_n\in (x-\varepsilon,x+\varepsilon)\subset \overline{A}$, de manera que $x_n\notin A$ $\forall n\geq k$, lo que contradice que $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ sea una sucesión de números en A. Por tanto, debe ser $x\in A$.

Veamos ahora el otro sentido de la implicación. Supongamos que cualquier sucesión de números en A que converge, lo hace a un número de A. Si A no es cerrado, entonces \overline{A} no es abierto, de manera que existe $x \in \overline{A}$ tal que $(x-\varepsilon,x+\varepsilon) \cap A \neq \emptyset$ $\forall \varepsilon > 0$. En particular, para cada $n \in \mathbb{N}$ se tiene que $(x-\frac{1}{n},x+\frac{1}{n}) \cap A \neq \emptyset$, por lo que podemos tomar $x_n \in (x-\frac{1}{n},x+\frac{1}{n}) \cap A$ de manera que la sucesión $(x_n)_{n=1}^\infty$ es una sucesión en A y además $|x_n-x|<\frac{1}{n}$ $\forall n \in \mathbb{N}$, así que, $\lim_{n\to\infty} x_n = x \notin A$, lo que contradice la hipótesis de partida, por lo que A debe ser cerrado.

Corolario 4.1. Cualquier sucesión de números reales en un conjunto cerrado y acotado tiene una subsucesión convergente a un número del conjunto.

i Demostración

 $\begin{array}{l} {\it Demostraci\'on.} \ {\rm Sea} \ A \subset \mathbb{R} \ {\rm un} \ {\rm conjunto} \ {\rm cerrado} \ {\rm y} \ {\rm acotado}, \ {\rm y} \ {\rm sea} \ (x_n)_{n=1}^\infty \ {\rm una} \ {\rm suscesi\'on} \ {\rm en} \ A. \ {\rm Como} \ A \ {\rm est\'a} \ {\rm acotado}, \ (x_n)_{n=1}^\infty \ {\rm tambi\'en} \ {\rm lo} \ {\rm est\'a}, \ {\rm y} \ {\rm por} \ {\rm el} \ {\rm Teorema} \ 4.6 \ {\rm tiene} \ {\rm una} \ {\rm subsucesi\'on} \ (x_{r_n})_{n=1}^\infty \ {\rm convergente}. \ {\rm Ahora} \ {\rm bien}, \ {\rm como} \ (x_{r_n})_{n=1}^\infty \ {\rm convergente} \ {\rm georgente} \ {\rm est\'a} \ {\rm definida} \ {\rm en} \ A \ {\rm que} \ {\rm es} \ {\rm cerrado}, \ {\rm por} \ {\rm el} \ {\rm teorema} \ {\rm anterior}, \ {\rm se} \ {\rm concluye} \ {\rm que} \ {\rm lim}_{n\to\infty} \ x_{r_n} \in A. \end{array}$

4.5 Sucesiones propiamente divergentes

Ya hemos visto que una sucesión que no converge es divergente, pero existen distintos motivos por los que una sucesión puede no converger. En esta sección estudiamos un tipo particular de sucesiones que divergen porque no paran de crecer o decrecer.

Definición 4.8 (Sucesiones propiamente divergentes). Se dice que una sucesión de números reales $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ tiene a ∞ , y se denota $\lim_{n\to\infty}x_n=\infty$, si para cualquier $\varepsilon\in\mathbb{R}$ existe un $k\in\mathbb{N}$ tal que $x_n\geq\varepsilon$ $\forall n\geq k$.

Del mismo modo, se dice que $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ tiene a $-\infty$, y se denota $\lim_{n\to\infty} x_n = -\infty$, si para cualquier $\varepsilon \in \mathbb{R}$ existe un $k \in \mathbb{N}$ tal que $x_n \leq \varepsilon \ \forall n \geq k$.

Y se dice que $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ es propiamente divergente cuando $\lim_{n\to\infty} x_n = \pm \infty$.

Ejemplo 4.18. La sucesión $(-n)_{n=1}^{\infty}$ tiende a $-\infty$, ya que dado $\varepsilon < 0$, por la propiedad arquimediana, existe $k \in \mathbb{N}$ tal que $-\varepsilon < k$, de manera $\varepsilon > -k$, y por tanto, $\forall n \geq k$, $-n \leq -k < \varepsilon$.

La sucesión $(n^2)_{n=1}^{\infty}$ tiende a ∞ , ya que dado $\varepsilon > 0$, por la propiedad arquimediana, existe $k \in \mathbb{N}$ tal que $\sqrt{\varepsilon} < k$, de manera que $\forall n \geq k, n^2 \geq k^2 > \varepsilon$.

Proposición 4.5. Una sucesión monótona de números reales es propiamente divergente si y solo si no está acotada. Además, si la sucesión es creciente entonces tiende a ∞ , y si es decreciente tiende a $-\infty$.

Demostración

 $\begin{array}{l} {\it Demostraci\'on.} \ {\rm Sea} \ (x_n)_{n=1}^{\infty} \ {\rm una} \ {\rm sucesi\'on} \ {\rm creciente} \ {\rm y} \ {\rm no} \ {\rm acotada}. \ {\rm Entonces} \ {\rm dado} \ \varepsilon > \\ {\rm 0, \ como} \ \varepsilon \ {\rm no} \ {\rm es} \ {\rm cotada} \ {\rm de} \ {\rm la} \ {\rm sucesi\'on}, \ {\rm existe} \ k \in \mathbb{N} \ {\rm tal} \ {\rm que} \ x_k > \varepsilon. \ {\rm Por} \ {\rm tanto}, \ \forall n \geq k, \\ {\rm como} \ {\rm la} \ {\rm sucesi\'on} \ {\rm es} \ {\rm creciente}, \ {\rm se} \ {\rm tiene} \ {\rm que} \ x_n \geq x_k > \varepsilon. \ {\rm Luego} \ {\rm lim}_{n \to \infty} \ x_n = \infty. \\ {\rm De} \ {\rm forma} \ {\rm an\'aloga} \ {\rm se} \ {\rm prueba} \ {\rm que} \ {\rm si} \ (x_n)_{n=1}^{\infty} \ {\rm es} \ {\rm decreciente} \ {\rm y} \ {\rm no} \ {\rm acotada}, \ {\rm entonces} \ {\rm lim}_{n \to \infty} \ x_n = -\infty. \\ \end{array}$

Proposición 4.6. Sean $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ y $(y_n)_{n=1}^{\infty}$ dos sucesiones de números reales tales que $x_n \leq y_n \ \forall n \in \mathbb{N}$. Entonces, si $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ tiende $a \propto$, $(y_n)_{n=1}^{\infty}$ también tiende $a \propto$, y si $(y_n)_{n=1}^{\infty}$ tiende $a - \infty$, $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ también tiende $a - \infty$.

i Demostración

 $\begin{array}{l} \textit{Demostraci\'on}. \text{ Supongamos que } \lim_{n \to \infty} x_n = \infty. \text{ Dado } \varepsilon > 0, \text{ como } (x_n)_{n=1}^\infty \text{ tiende a } \infty, \text{ existe un } k \in \mathbb{N} \text{ tal que } x_n > \varepsilon \ \forall n \geq k, \text{ y por tanto también se cumple que } y_n \geq x_n > \varepsilon \ \forall n \geq k, \text{ de manera que } \lim_{n \to \infty} y_n = \infty. \end{array}$

De forma análoga se prueba que si $\lim_{n\to\infty}y_n=-\infty$, entonces $\lim_{n\to\infty}x_n=-\infty$.

Proposición 4.7. Sean $(x_n)_{n=1}^{\infty}$, $(y_n)_{n=1}^{\infty}$ y $(z_n)_{n=1}^{\infty}$ sucesiones de números reales tales $que \ \lim_{n \to \infty} x_n = \infty, \ \lim_{n \to \infty} y_n = \infty \ \ y \ \lim_{n \to \infty} z_n = -\infty, \ entonces$

- a. $\lim_{n\to\infty} (x_n + y_n) = \infty$.
- b. $\lim_{n\to\infty}(x_ny_n)=\infty$.
- c. $\lim_{n\to\infty} (x_n + z_n) = -\infty$.
- $\begin{array}{l} d. \ \lim_{n \to \infty} kx_n = \infty \ \forall k > 0 \ y \ \lim_{n \to \infty} kx_n = -\infty \ \forall k < 0. \\ e. \ \lim_{n \to \infty} \frac{1}{x_n} = 0. \end{array}$

Demostración

Demostración. Se deja como ejercicio.

Proposición 4.8. Sean $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ y $(y_n)_{n=1}^{\infty}$ dos sucesiones de números reales estrictamente positivos tales que la sucesión $\left(\frac{x_n}{y_n}\right)_{n=1}^{\infty}$ converge a $l \neq 0$. Entonces, $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ tiende $a \infty si y solo si (y_n)_{n=1}^{\infty} tiende a \infty.$

Demostración

Demostraci'on. Sea $\varepsilon=\frac{l}{2}>0$ ya que l>0 al ser las sucesiones estrictamente positivas. Como $\lim_{n\to\infty}\frac{x_n}{y_n}=l,$ existe $k\in\mathbb{N}$ tal que $\forall n\geq k$ se tiene

$$\begin{split} |x_n - l| < \varepsilon &= \frac{l}{2} \Rightarrow \frac{-l}{2} < \frac{x_n}{y_n} - l < \frac{l}{2} \\ &\Rightarrow \frac{l}{2} < \frac{x_n}{y_n} < \frac{3l}{2} \\ &\Rightarrow \frac{l}{2} y_n < x_n < \frac{3l}{2} y_n. \end{split}$$

Ahora, si $\lim_{n\to\infty} x_n = \infty$, por el teorema anterior, se tiene que $\lim_{n\to\infty} \frac{3l}{2}y_n = \infty$, y como $\frac{3l}{2}>0$ se concluye que $\lim_{n\to\infty}y_n=\infty.$

Del mismo modo, si $\lim_{n\to\infty}y_n=\infty$ entonces $\lim_{n\to\infty}\frac{l}{2}y_n=\infty$, y por el teorema anterior, se tiene que $\lim_{n\to\infty} x_n = \infty$.

4.6 Sucesiones de Cauchy

En la última sección de este capítulo, se introducen un tipo particular de sucesiones convergente que son de especial importancia para la definición de los números reales.

Definición 4.9 (Sucesión de Cauchy). Se dice que una sucesión $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ es una sucesión de Cauchy si para cualquier $\varepsilon > 0$ existe un $k \in \mathbb{N}$ tal que $|x_n - x_m| < \varepsilon \ \forall n, m \ge k$.

Teorema 4.8 (Criterio de convergencia de Cauchy). Una sucesión de números reales es convergente si y solo si es una sucesión de Cauchy.

i Demostración

 $\begin{array}{l} {\it Demostraci\'on}. \ {\rm Sea} \ (x_n)_{n=1}^{\infty} \ {\rm una} \ {\rm sucesi\'on} \ {\rm convergente} \ {\rm a} \ x. \ {\rm Entonces}, \ {\rm dado} \ \varepsilon > 0, \\ {\rm tomando} \ \varepsilon' = \frac{\varepsilon}{2} > 0 \ {\rm existe} \ k \in \mathbb{N} \ {\rm tal} \ {\rm que} \ |x_n - x| < \varepsilon' \ \forall n \geq k. \end{array}$

Ahora, si se toma
$$n, m \ge k$$
, se tiene, aplicando la desigualdad triangular,

por lo que $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ es una sucesión de Cauchy.

Veamos ahora al implicación en el otro sentido. Sea $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ una sucesión de Cauchy. Entonces, dado $\varepsilon=1$, existe $k\in\mathbb{N}$ tal que $|x_n-x_m|<1$ $\forall n,m\geq k$. Así pues, si $n\geq k$, se tiene, aplicando de nuevo la desigualdad triangular,

 $|x_n - x_m| = |(x_n - x) + (x - x_m)| \le |x_n - x| + |x - x_m| < \varepsilon' + \varepsilon' = \varepsilon,$

$$|x_n| = |x_n - x_k + x_k| < |x_n - x_k| + |x_k| < 1 + |x_k|$$

Si se toma $c=\max(\{|x_1|,\dots,|x_{k-1}|,1+|x_k|\})$ entonces c es una cota de $(x_n)_{n=1}^\infty$. Aplicando ahora el Teorema 4.6 existe una subsucesión convergente $(x_{r_n})_{n=1}^\infty$ de $(x_n)_{n=1}^\infty$.

Sea $\lim_{n\to\infty} x_{r_n} = x$. Veamos que $(x_n)_{n=1}^\infty$ converge a x. Dado $\varepsilon > 0$, sea $\varepsilon' = \frac{\varepsilon}{2} > 0$. Como $(x_n)_{n=1}^\infty$ es una sucesión de Cauchy, existe $k_1 \in \mathbb{N}$ tal que $|x_n - x_m| < \varepsilon' \forall n, m \geq k_1$. Por otro lado, como $(x_{r_n})_{n=1}^\infty$ converge a x, existe $k_2 \in \mathbb{N}$ tal que $|x_{r_n} - x| < \varepsilon' \ \forall n \geq k_2$. Tomando $k = \max(\{k_1, k_2\})$, para cualquier $n \geq k$ se tiene, de nuevo por la desigualdad triangular,

$$|x_n-x|=|x_n-x_{r_k}+x_{r_k}-x|\leq |x_n-x_{r_k}|+|x_{r_k}-x|<\varepsilon'+\varepsilon'=\varepsilon,$$

pues $r_k \ge k \ge k_1$. Por consiguiente, $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ converge a x.

Ejemplo 4.19. Veamos que la sucesión $\left(\frac{1}{n}\right)_{n=1}^{\infty}$ es de Cauchy. Dado $\varepsilon > 0$, tomando $\frac{2}{\varepsilon} > 0$, por la propiedad arquimediana, existe $k \in \mathbb{N}$ tal que $\frac{2}{\varepsilon} < k$ y, por tanto, $\frac{2}{k} < \varepsilon$. Ahora, para cualquier $n, m \geq k$ se tiene

$$\left|\frac{1}{n} - \frac{1}{m}\right| \le \left|\frac{1}{n}\right| + \left|\frac{1}{m}\right| = \frac{1}{n} + \frac{1}{m} \le \frac{1}{k} + \frac{1}{k} = \frac{2}{k} < \varepsilon.$$

Sin embargo, la sucesión $(n)_{n=1}^{\infty}$ no es de Cauchy, ya que, dado $\varepsilon=1$, para cualquier $k\in\mathbb{N}$, si tomamos $n=k\geq k$ y $m=k+2\geq k$, se tiene que $|x_n-x_m|>|k-(k+2)|=2>1=\varepsilon$.

Las sucesiones de Cauchy juegan un papel clave en la construcción de cuerpos completos, en particular el cuerpo de los números Reales, ya que el hecho de que sus términos estén cada vez más cerca los unos de los otros, hace que aquellos cuerpos en los que cualquier sucesión de Cauchy converge a un elemento del cuerpo sean cuerpos sin huecos o completos.

Ejemplo 4.20. El cuerpo de los números racionales \mathbb{Q} no es completo ya que existen sucesiones de Cauchy de números racionales, como $\left((1+\frac{1}{n})^n\right)_{n=1}^{\infty}$, que converge al número e que no es racional.

El conjunto de los números irracionales \mathbb{R} \mathbb{Q} tampoco es completo, pues existen sucesiones de Cauchy de números irracionales, como $(2^{1/(n+1)})_{n=1}^{\infty}$, que converge a 1 que no es irracional.

5 Funciones reales de variable real

El concepto de función es fundamental para poder modelizar las relaciones que se dan en muchos fenómenos del mundo real, donde una magnitud depende de otras de acuerdo a un determinado patrón, y por ello, gran parte del Análisis Matemático se centra en estudiar las características de las funciones.

En el capítulo sobre teoría de conjuntos se introdujo ya el concepto de función y se estudiaron algunas de sus propiedades desde el enfoque de una relación entre conjuntos. En este capítulo se estudian las principales propiedades de una función y se introducen varias funciones básicas que se conocen como funciones elementales.

5.1 El concepto de función

Definición 5.1 (Función de una variable). Una función f de un conjunto A en otro B es una relación que asocia cada elemento $a \in A$, con un único elemento de B que se denota f(a), y se llama imagen de a mediante f.

$$f:A\longrightarrow B$$
$$a\longrightarrow f(a)$$

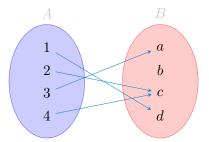


Figura 5.1: Ejemplo de función.

Cuando el conjunto inicial y final es el de los números reales \mathbb{R} , entonces se dice que $f: \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ es una función real de variable real.

5.1.1 Formas de representar una función

Existen distintas formas de representar los pares de elementos que forman parte de una función.

Por extensión

• Representación en forma de tabla. Se escriben los pares (x,y) de la función de forma explícita en una tabla.

\boldsymbol{x}	-2	-1	0	1	2	:
y	4	1	0	1	4	•••

• Representación gráfica. Se representan los pares (x,y) de la función mediante puntos con las correspondientes coordenadas en el plano Real cartesiano.

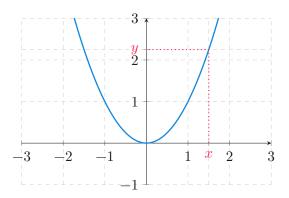


Figura 5.2: Gráfica de una función.

Por Intensión

• Representación algebraica explícita. Se da fórmula o expresión f(x) que determina el valor de y asociado a cada x mediante la función.

$$y = x^2$$

• Representación algebraica implícita. Se da una ecuación que relaciona dos variables x e y, que satisfacen todos los pares (x, y) de la función y solo ellos.

$$y - x^2 = 0$$

• Representación algebraica paramétrica

$$\begin{cases} y = t^2 \\ x = t \end{cases}$$

Precaución

La representación algebraica paramétrica puede dar lugar a relaciones que no son funciones. Por ejemplo

$$\begin{cases} y = t \\ x = t^2 \end{cases}$$

que no es una función al asignar a los valores de x dos imágenes distintas.

5.2 Dominio de una función

Definición 5.2 (Dominio de una función). El dominio de una función f es el conjunto de valores para los que la función está definida

$$Dom(f) = \{x \in \mathbb{R} : f(x) \in \mathbb{R}\}\$$

Ejemplo 5.1. Dada la función

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{x^2 - 1}}$$

Para determinar su dominio hay que eliminar los valores en los que no está definida la función. En este caso hay que eliminar los valores que hacen negativo el radicando de la raíz del denominador, es decir, los valores de x tales que $x^2 - 1 < 0$, que son los valores que cumplen -1 < x < 1, pero también hay que eliminar del dominio los valores que anulan el denominador, es decir, los valores de x tales que $\sqrt{x^2-1}=0$, que son x=-1y x = 1. Por tanto, su dominio es

$$\mathrm{Dom}(f) = (-\infty, -1) \cup (1, \infty)$$

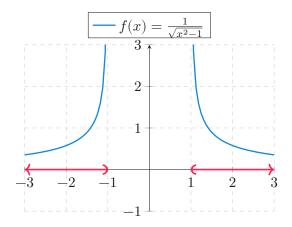


Figura 5.3: Dominio de la función $f(x) = \frac{1}{\sqrt{x^2-1}}$.

5.3 Imagen de una función

Definición 5.3 (Imagenñ de una función). La imagen de una función f es el conjunto de valores que la función puede tomar

$$Img(f) = \{ y \in \mathbb{R} : y = f(x) \text{ para algún } x \in \mathbb{R} \}$$

Ejemplo 5.2. Dada la función $f(x) = x^2 - 2$

Su imagen es

$$\mathrm{Img}(f) = [-2, \infty)$$

ya que la función cuadrática x^2 puede tomar cualquier valor de 0 a ∞ (no toma nunca valores negativos), y al restarle 2, el mínimo valor que puede tomar la función f es -2.

5.4 Álgebra de funciones

5.4.1 Función constante



Figura 5.4: Imagen de la función $f(x) = x^2 - 2$.

Definición 5.4 (Función constante). Se dice que una función $f : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ es una funcion constante, cuando asocia cada elemento $x \in \mathbb{R}$ con el mismo número $c \in \mathbb{R}$, es decir,

$$f(x) = c \ \forall x \in \mathbb{R}.$$

El dominio de la función constante f(x) = c es \mathbb{R} y su imagen $\{c\}$.

5.4.2 Función identidad

Definición 5.5 (Función Identidad). Se llama función identidad, a la función $Id : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ que asocia cada elemento $x \in \mathbb{R}$ con sigo mismo, es decir,

$$Id(x) = x$$
.

El dominio y la imagen de la función identidad es \mathbb{R} .

Definición 5.6 (Funciones suma, resta, producto y cociente). Dadas dos funciones $f, g : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ se definen las siguientes funciones:



Figura 5.5: Gráfica de una función constante.



Figura 5.6: Gráfica de la función identidad.

- Función suma: $(f+g)(x) = f(x) + g(x) \ \forall x \in \mathbb{R}$.
- Función resta: $(f-g)(x) = f(x) g(x) \ \forall x \in \mathbb{R}$.
- Función producto: $(f \cdot g)(x) = f(x) \cdot g(x) \ \forall x \in \mathbb{R}.$
- Función cociente: $(f/g)(x) = \frac{f(x)}{g(x)} \ \forall x \in \mathbb{R} \text{ tal que } g(x) \neq 0.$

Proposición 5.1. Dadas dos funciones $f, g : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$, se cumple:

- $Dom(f+g) = Dom(f) \cap Dom(g)$
- $\bullet \ \operatorname{Dom}(f-g) = \operatorname{Dom}(f) \cap \operatorname{Dom}(g)$
- $Dom(f \cdot g) = Dom(f) \cap Dom(g)$
- $\operatorname{Dom}(f/g) = (\operatorname{Dom}(f) \cap \operatorname{Dom}(g)) \quad \{x \in \mathbb{R} : g(x) = 0\}.$

Definición 5.7 (Función raíz). Dada una función $f: \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ se definen la _función raíz n-ésima, como

$$\sqrt[n]{f(x)} = \sqrt[n]{f(x)} \ \forall x \in \mathbb{R}.$$

Proposición 5.2. Dada una función $f: \mathbb{R} \to \mathbb{R}$, se cumple que

$$\mathrm{Dom}(\sqrt[n]{f}) = \begin{cases} \mathrm{Dom}(f) & \text{si n es impar,} \\ \mathrm{Dom}(f) & \{x \in \mathbb{R} : f(x) < 0\} & \text{si n es par} \end{cases}$$

5.5 Composición de funciones

Definición 5.8 (Composición de funciones). Dadas dos funciones $g:A\to B$ y $f:B\to C$, se define la función compuesta $f\circ g$, (leído g compuesto con f) como la función

$$f \circ g : A \longrightarrow C$$

 $x \longrightarrow f(g(x))$

Para calcular la función compuesta $f \circ g(x)$, primero se aplica g sobre x y luego, se aplica f sobre g(x):

$$x \stackrel{g}{\longrightarrow} g(x) \stackrel{f}{\longrightarrow} f(g(x))$$

Ejemplo 5.3. Si $g(x) = \sqrt{x}$ y $f(x) = \sin x$, entonces

$$f \circ g(x) = f(g(x)) = f(\sqrt{x}) = \operatorname{sen} \sqrt{x}.$$

5.6 Función inversa

Definición 5.9 (Función inversa). Se llama función inversa de $f: A \to B$ a la función $f^{-1}: B \to A$ (cuando exista) que cumple

$$f \circ f^{-1} = f^{-1} \circ f = Id(x)$$

La función inversa de f deshace o revierte el efecto de f. Es decir, si $f:A\to B$ asocia un elemento $x\in A$ con otro $y\in B$, entonces f^{-1} asocia el elemento y con el x.

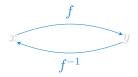


Figura 5.7: Función inversa.

Ejemplo 5.4. La inversa de $f(x) = x^3$ es la función $f^{-1}(x) = \sqrt[3]{x}$. Sin embargo, la inversa de la función x^2 no es \sqrt{x} ya que la raíz tiene dos imágenes, una positiva y otra negativa, y por tanto no sería una función. ¹

¹Para que exista la inversa de la función cuadrática es necesario restringir el dominio a los reales positivos para que sea inyectiva. En tal caso, la inversa es $+\sqrt{x}$.

5.7 Crecimiento de una función

Definición 5.10 (Función creciente y decreciente). Se dice que una función f es creciente en un intervalo I, si para todo $x_1, x_2 \in I$, con $x_1 < x_2$, se cumple $f(x_1) \le f(x_2)$.

Se dice que una función f es decreciente en un intervalo I, si para todo $x_1, x_2 \in I$, con $x_1 < x_2$, se cumple $f(x_1) \ge f(x_2)$.



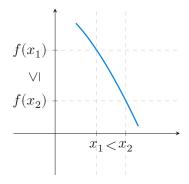


Figura 5.8: Función creciente.

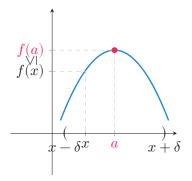
Figura 5.9: Función decreciente.

5.8 Extremos de una función

Definición 5.11 (Máximo y mínimo relativo). Se dice que una función f: $mathbb{R} \to \mathbb{R}$ tiene un máximo relativo en a, si existe un $\delta > 0$ tal que para todo $x \in (a - \delta, a + \delta)$ se cumple $f(a) \ge f(x)$.

Y se dice que f tiene un mínimo relativo en a, si existe un $\delta > 0$ tal que para todo $x \in (a - \delta, a + \delta)$ se cumple $f(a) \leq f(x)$.

5.9 Concavidad de una función



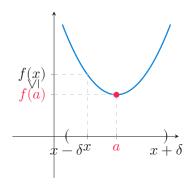


Figura 5.10: Máximo relativo.

Figura 5.11: Mínimo relativo.

Definición 5.12 (Función cóncava hacia arriba y hacia abajo). Se dice que una función f es cóncava hacia arriba en un intervalo I, si para todo $x_1, x_2 \in I$, con $x_1 < x_2$, se cumple que el segmento que une los puntos $(x_1, f(x_1))$ y $(x_2, f(x_2))$ queda por encima de la gráfica de f.

Se dice que una función f es c'oncava hacia abajo en un intervalo I, si para todo $x_1, x_2 \in I$, con $x_1 < x_2$, se cumple que el segmento que une los puntos $(x_1, f(x_1))$ y $(x_2, f(x_2))$ queda por debajo de la gráfica de f.

Al punto donde cambia la concavidad de una función se le llama punto de inflexión.



Figura 5.12: Función cóncava hacia arriba. Figura 5.13: Función cóncava hacia abajo.

5.10 Funciones periódicas

Definición 5.13 (Función periódica y periodo). Se dice que una función f es periódica si existe un valor h > 0 tal que

$$f(x+h) = f(x)$$

para todo $x \in \text{Dom}(f)$.

Al menor valor de h que verifica la igualdad anterior se le llama periodo de f, y a la diferencia entre el máximo y el mínimo de la función se le llama amplitud de f.

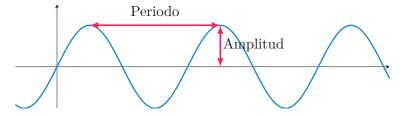


Figura 5.14: Periodo y amplitud de una función periódica.

5.11 Funciones polinómicas

Definición 5.14 (Función polinómica). Una función polinómica es una función de la forma

$$f(x)=a_0+a_1x+a_2x^2+\cdots+a_nx^n,$$

donde n es un entero no negativo que se llama $grado\ del\ polinomio,\ y\ a_0,\dots,a_n$ son constantes reales $(a_n\neq 0)$ que se llaman $coeficientes\ del\ polinomio.$

Ejemplo 5.5.

5.11.1 Propiedades de las funciones polinómicas

- Su dominio es \mathbb{R} .
- Si el grado es impar, su imagen es \mathbb{R} .
- La función identidad Id(x) = x es un polinomio de grado 1.
- Las funciones constantes f(x) = c son polinomios de grado 0.
- Un polinomio de grado n tiene a lo sumo n raíces (puntos donde f(x) = 0).



Figura 5.15: Gráficas de funciones polinómicas.

5.12 Funciones racionales

Definición 5.15 (Función racional). Una función racional es una función de la forma

$$f(x) = \frac{p(x)}{q(x)}$$

donde p(x) y q(x) son funcione polinómicas con $q(x) \neq 0$.

Ejemplo 5.6.

5.12.1 Propiedades de las funciones racionales

- Su dominio es $\mathbb R$ menos las raíces del polinomio del denominador. En estos puntos suele haber asíntotas verticales.
- La tendencia en ∞ y $-\infty$ depende del grado del numerador y del denominador. Si $f(x)=\frac{a_0+\cdots+a_nx^n}{b_0+\cdots+b_mx^m}, \, \text{entonces}$

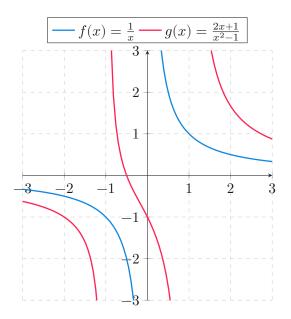


Figura 5.16: Gráficas de funciones racionales.

$$- \operatorname{Si} n > m \to f(\pm \infty) = \pm \infty.$$

$$- \operatorname{Si} n < m \to f(\pm \infty) = 0.$$

$$- \operatorname{Si} n = m \to f(\pm \infty) = \frac{a_n}{b_m}.$$

- Los polinomios son casos particulares de funciones racionales.
- Pueden descomponerse en suma de fracciones simples.

5.13 Funciones potenciales

Definición 5.16 (Función potencial). Una función potencial es una función de la forma

$$f(x) = x^r,$$

donde r es un número real.

Ejemplo 5.7.

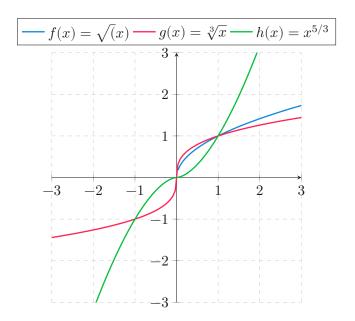


Figura 5.17: Gráficas de funciones potenciales.

5.13.1 Propiedades de las funciones potenciales

• Si el exponente es un número racional n/m, entonces

$$x^{n/m} = \sqrt[m]{x^n}$$
.

Estas funciones se llaman irracionales. En este caso,

- si m es impar el dominio es \mathbb{R} ,
- si m es par el dominio es \mathbb{R}^+ .
- Todas pasan por el punto (1,1).
- El crecimiento depende del exponente. Si x>0 entonces:
 - Exponente positivo \Rightarrow función creciente.
 - Exponente negativo \Rightarrow función decreciente.
 - Además, si $f(x) = x^r$ y $g(x) = x^s$, entonces:
 - Si $r < s \Rightarrow f(x) > g(x)$ si 0 < x < 1 y f(x) < g(x) si x > 1.
 - Si $r > s \Rightarrow f(x) < g(x)$ si 0 < x < 1 y f(x) > g(x) si x > 1.
- Los polinomios de la forma $f(x) = x^n$ son un caso particular de funciones potenciales.

5.14 Funciones exponenciales

Definición 5.17 (Función exponencial). Una función exponencial de base a es una función de la forma

$$f(x) = a^x$$

donde a es un valor real positivo distinto de 1.

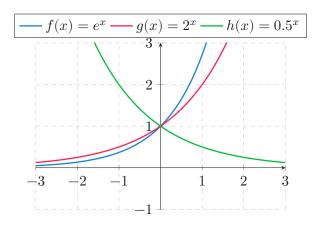


Figura 5.18: Gráficas de funciones exponenciales.

Ejemplo 5.8.

5.14.1 Propiedades de las funciones exponenciales

- Su dominio es \mathbb{R} .
- Su imagen es \mathbb{R}^+ .
- Todas pasan por el punto (0,1).
- El crecimiento depende de la base. Si $f(x) = a^x$ entonces
 - Si $0 < a < 1 \Rightarrow$ función decreciente.
 - Si $a > 1 \Rightarrow$ función creciente. Además, si $f(x) = a^x$ y $g(x) = b^x$ con a < b, entonces
 - Si $x < 0 \Rightarrow f(x) > g(x)$.
 - Si $x > 0 \Rightarrow f(x) < g(x)$.
- Un caso particular sería a=1 que es una función constante.

5.15 Funciones logarítmicas

Definición 5.18 (Función logarítmica). Dada una función exponencial $f(x) = a^x$, se define la función logarítmica de base a como la función inversa de f, y se denota

$$f^{-1}(x) = \log_a x,$$

donde a es un valor real positivo distinto de 1.

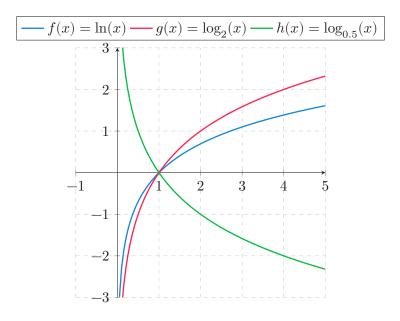


Figura 5.19: Gráficas de funciones logaritmicas.

Ejemplo 5.9.

5.15.1 Propiedades de las funciones logarítmicas

- Por ser la inversa de la función exponencial, sus gráficas son simétricas respecto a la bisectriz del primer y tercer cuadrantes. Por tanto:
 - Su dominio es la imagen de la función exponencial, es decir \mathbb{R}^+ .
 - Su imagen es el dominio de la función exponencial, es decir \mathbb{R} .
- Todas pasan por el punto (1,0).
- El crecimiento depende de la base. Si $f(x) = \log_a x$ entonces
 - Si 0 < a < 1 ⇒ función decreciente.
 - Si $a>1 \Rightarrow$ función creciente. Además, si $f(x)=\log_a x$ y $g(x)=\log_b x$ con a< b, entonces

$$- Si 0 < x < 1 \Rightarrow f(x) < g(x).$$

$$- Si x > 1 \Rightarrow f(x) > g(x)$$

• No tiene sentido para a=1 por que sería una función constante.

5.16 Funciones trigonométricas

Surgen en geometría al medir las relaciones entre los catetos de un triángulo rectángulo, que dependen del ángulo del cateto contiguo y la hipotenusa de dicho triángulo. No obstante, esta no es la única definición posible, sino que también pueden definirse a partir de la función exponencial compleja.

- Seno
- Coseno
- Tangente
- Arcoseno
- Arcocoseno
- Arcotangente

5.16.1 Seno de un ángulo

Definición 5.19 (Seno de un ángulo). Sea α cualquiera de los ángulos agudos de un triángulo rectángulo, se define el *seno* de α , y se nota sen α , como el cociente entre el cateto opuesto y la hipotenusa.

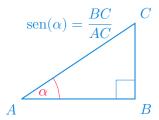


Figura 5.20: Seno de un ángulo de un triángulo rectángulo.

La definición se extiende fácilmente a ángulos de circunferencia con vértice en el origen y uno de sus lados el eje OX, como el cociente entre la ordenada de cualquier punto del otro lado y su distancia al vértice.

5.16.2 Función seno

Definición 5.20 (Función seno). Se define la función seno,

$$f(x) = \operatorname{sen}(x)$$

como la función que asocia a cada ángulo x (habitualmente medido en radianes) su seno.

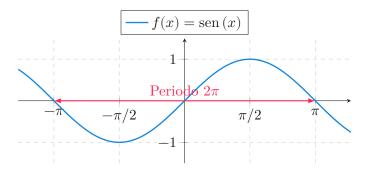


Figura 5.21: Gráfica de la función seno.

Ejemplo 5.10.

5.16.3 Propiedades de la función seno

- Su dominio es \mathbb{R} .
- Su imagen es el intervalo [-1, 1].
- Es periódica, con periodo 2π y amplitud 2

$$\operatorname{sen}(x + 2k\pi) = \operatorname{sen} x \quad \forall k \in \mathbb{Z}$$

- Algunos valores para recordar: $\sin 0 = 0$, $\sin \pi/6 = 1/2$, $\sin \pi/4 = \sqrt{2}/2$, $\sin \pi/3 = \sqrt{3}/2$, $\sin \pi/2 = 1$, $\sin \pi = 0$, $\sin 3\pi/2 = -1$, $\sin 2\pi = 0$.
- Es una función impar: sen(-x) = -sen x.

5.16.4 Coseno de un ángulo

Definición 5.21 (Coseno de un ángulo). Sea α cualquiera de los ángulos agudos de un triángulo rectángulo, se define el *coseno* de α , y se nota $\cos \alpha$, como el cociente entre el cateto contiguo y la hipotenusa.

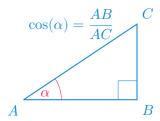


Figura 5.22: Coseno de un ángulo de un triángulo rectángulo.

La definición se extiende fácilmente a ángulos de circunferencia con vértice en el origen y uno de sus lados el eje OX, como el cociente entre la abscisa de cualquier punto del otro lado y su distancia al vértice.

5.16.5 Función coseno

Definición 5.22 (Función coseno). Se define la función coseno,

$$f(x) = \cos(x)$$

como la función que asocia a cada ángulo x (habitualmente medido en radianes) su coseno.

Ejemplo 5.11.



Figura 5.23: Gráfica de la función coseno.

5.16.6 Propiedades de la función coseno

- Su dominio es \mathbb{R} .
- Su imagen es el intervalo [-1, 1].
- Es periódica, con periodo 2π y amplitud 2

$$\cos(x + 2k\pi) = \cos x \quad \forall k \in \mathbb{Z}$$

- Algunos valores para recordar: $\cos 0 = 1$, $\cos \pi/6 = \sqrt{3}/2$, $\cos \pi/4 = \sqrt{2}/2$, $\cos \pi/3 = \sqrt{2}/2$, $\cos \pi/2 = 0$, $\cos \pi = -1$, $\cos 3\pi/2 = 0$, $\cos 2\pi = 1$.
- Es una función par: $\cos(-x) = \cos x$.

5.16.7 Tangente de un ángulo

Definición 5.23 (Tangente de un ángulo). Sea α cualquiera de los ángulos agudos de un triángulo rectángulo, se define la *tangente* de α , y se nota tg α , como el cociente entre el cateto opuesto y el cateto contiguo.



Figura 5.24: Tangente de un ángulo de un triángulo rectángulo.

La definición se extiende fácilmente a ángulos de circunferencia con vértice en el origen y uno de sus lados el eje OX, como el cociente entre la ordenada y la abscisa de cualquier punto del otro lado.

5.16.8 Función tangente

Definición 5.24 (Función tangente). Se define la función tangente,

$$f(x) = \operatorname{tg}(x) = \frac{\operatorname{sen}(x)}{\cos(x)}$$

como la función que asocia a cada ángulo \boldsymbol{x} (habitualmente medido en radianes) su tangente.

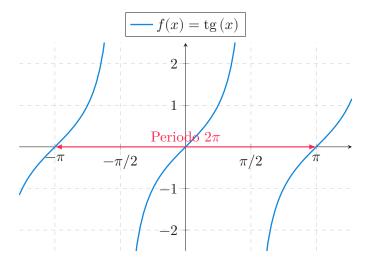


Figura 5.25: Gráfica de la función tangente.

Ejemplo 5.12.

5.16.9 Propiedades de la función tangente

- Su dominio es \mathbb{R} menos las raíces del coseno, es decir $\mathbb{R} \{2k\pi/2 : k \in \mathbb{Z}\}.$
- Su imagen es \mathbb{R} .

• Es periódica, con periodo 2π

$$tg(x + 2k\pi) = tg x \quad \forall k \in \mathbb{Z}$$

• Algunos valores para recordar: tg 0 = 0, $tg \pi/6 = 1/\sqrt{3}$, $tg \pi/4 = 1$, $tg \pi/3 = \sqrt{3}$, $tg \pi = 0$, $tg 2\pi = 0$.

5.16.10 Función arcoseno

Definición 5.25 (Función arcoseno). Se define la función arcoseno,

$$f(x) = \arcsin(x)$$

como la función inversa de la función seno.

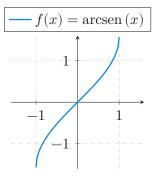


Figura 5.26: Gráfica de la función arcoseno.

Ejemplo 5.13.

5.16.11 Propiedades de la función arcoseno

- Por ser la inversa de la función seno, sus gráficas son simétricas respecto a la bisectriz del primer y tercer cuadrantes. Por tanto:
 - Su dominio es la imagen de la función seno, es decir [-1,1].
 - Su imagen es el dominio restringido de la función seno, es decir $[-\pi/2, \pi/2]$.
- Es creciente en todo el dominio.

²Se pude simplificar porque aunque $x \to 1$, $x \neq 1$ y por tanto el denominador no se anula.

5.16.12 Función arcocoseno

Definición 5.26 (Función arcocoseno). Se define la función arcocoseno,

$$f(x) = \arccos(x)$$

como la función inversa de la función coseno.

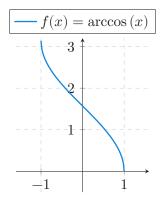


Figura 5.27: Gráfica de la función arcocoseno.

Ejemplo 5.14.

5.16.13 Propiedades de la función arcoseno

- Por ser la inversa de la función coseno, sus gráficas son simétricas respecto a la bisectriz del primer y tercer cuadrantes. Por tanto:
 - Su dominio es la imagen de la función coseno, es decir [-1,1].
 - Su imagen es el dominio restringido de la función coseno, es decir $[0,\pi]$. ³
- Es decreciente en todo el dominio.

 $^{^3}$ Para que exista la inversa de la función coseno, es necesario restringir su dominio a $[0,\pi]$ para que sea invectiva.

5.16.14 Función arcotangente

Definición 5.27 (Función arcotangente). Se define la función arcotangente,

$$f(x) = \arctan(x)$$

como la función inversa de la función tangente.

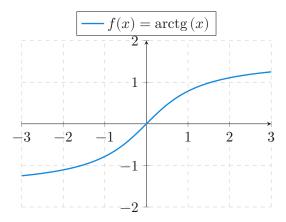


Figura 5.28: Gráfica de la función arcotangente.

Ejemplo 5.15.

5.16.15 Propiedades de la función arcotangente

- Por ser la inversa de la función tangente, sus gráficas son simétricas respecto a la bisectriz del primer y tercer cuadrantes. Por tanto:
 - Su dominio es la imagen de la función tangente, es decir \mathbb{R} .
 - Su imagen es el dominio restringido de la función tangente, es decir $(-\pi/2,\pi/2)$. 4
- Es creciente en todo el dominio.

⁴Para que exista la inversa de la función tangente, es necesario restringir su dominio a $(\pi/2, \pi/2)$ para que sea inyectiva.

5.16.16 Algunas relaciones trigonométricas

•
$$\sin^2 x + \cos^2 x = 1$$

•
$$\operatorname{sen}(x+y) = \operatorname{sen} x \cos y + \cos x \operatorname{sen} y$$

•
$$\cos(x+y) = \cos x \cos y - \sin x \sin y$$

•
$$\operatorname{tg}(x+y) = \frac{\operatorname{tg} x + \operatorname{tg} y}{1 - \operatorname{tg} x \operatorname{tg} y}$$

•
$$\operatorname{sen} x + \operatorname{sen} y = 2 \operatorname{sen} \frac{x+y}{2} \cos \frac{x-y}{2}$$

•
$$\operatorname{sen}(x+y) = \operatorname{sen} x \cos y + \cos x \operatorname{sen} y$$

• $\operatorname{cos}(x+y) = \cos x \cos y - \operatorname{sen} x \operatorname{sen} y$
• $\operatorname{tg}(x+y) = \frac{\operatorname{tg} x + \operatorname{tg} y}{1 - \operatorname{tg} x \operatorname{tg} y}$
• $\operatorname{sen} x + \operatorname{sen} y = 2 \operatorname{sen} \frac{x+y}{2} \cos \frac{x-y}{2}$
• $\cos x + \cos y = 2 \cos \frac{x+y}{2} \cos \frac{x-y}{2}$
• $\cos x - \cos y = -2 \operatorname{sen} \frac{x+y}{2} \operatorname{sen} \frac{x-y}{2}$

•
$$\cos x - \cos y = -2 \operatorname{sen} \frac{x+y}{2} \operatorname{sen} \frac{x-y}{2}$$

Notas

6 Límites de funciones

En este capítulo se introduce el concepto de límite de una función real de variable real, que es parecido al que ya se vio para sucesiones de números reales, y resulta imprescindible para llegar al concepto de derivada que se verá en el siguiente capítulo.

Se presentan también algunas propiedades de los límites, distintas técnicas para calcularlos y algunas aplicaciones importantes. Finalmente se introduce también el concepto de continuidad y se estudian los distintos tipos de discontinuidades que puede presentar una función.

6.1 El concepto de límite

6.1.1 Aproximación al concepto de límite

El concepto de límite está ligado al de tendencia.

Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$, se dice que $x \in A$ tiende a un número $a \in \mathbb{R}$, y lo escribimos $x \to a$, si se pueden tomar valores de x tan próximos a a como se quiera, pero sin llegar a valer a.



Advertencia

Para que $x \in A$ tienda a a, es necesario que a sea un punto de acumulación de A.

Si la aproximación es por defecto (con valores menores que a) se dice que x tiende a apor la izquierda, y se escribe $x \to a^-$, y si es por exceso (con valores mayores que a) se dice que x tiende a a por la derecha, y se escribe $x \to a^+$.

Cuando la variable x de una función f tiende a un valor a, cabe preguntarse si sus imágenes mediante f tienden a otro valor concreto:

Si f(x) tiende a un valor l cuando x tiende a a, se dice que l es el límite de f(x) cuando $x \to a$, y se escribe

$$\lim_{x\to a} f(x) = l.$$

6.1.2 Límites laterales

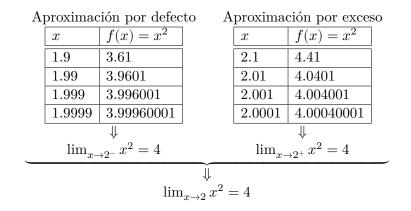
Si f(x) tiende a l cuando x tiende a a por la izquierda, entonces se dice que l es el *límite* por la izquierda de f(x) cuando $x \to a^-$, y se escribe

$$\lim_{x \to a^{-}} f(x) = l.$$

Si f(x) tiende a l cuando x se aproxima a a por exceso, entonces se dice que l es el *límite* por la derecha de f(x) cuando $x \to a^-$, y se escribe

$$\lim_{x \to a^+} f(x) = l.$$

Ejemplo 6.1. Consideremos la función $f(x) = x^2$ y veamos que pasa cuando $x \to 2$:



6.1.3 Límites que no existen (I)

Si la función no está definida entorno a un punto, entonces no existe el límite en dicho punto.

Ejemplo 6.2. Consideremos la función $f(x) = \frac{1}{\sqrt{x^2 - 1}}$ y veamos que pasa cuando $x \to 0$:

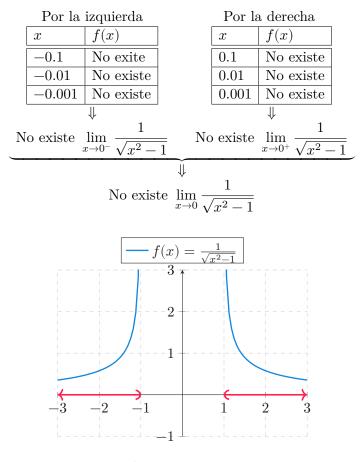


Figura 6.1: Límite que no existe en x = 0.

6.1.4 Límites que no existen (II)

Cuando los límites laterales no coinciden entonces no existe el límite.

Ejemplo 6.3. Consideremos la función $f(x) = \frac{|x|}{x}$ y veamos que pasa cuando $x \to 0$:

Por la izo	Por la derecha				
x	x f(x)		x	f(x)	
-0.1	-1		0.1	1	
-0.01	-1		0.01	1	
-0.001	-1		0.001	1	
$\overline{\qquad}$			$\overline{}$,	
$\lim_{x \to 0^-} \frac{ x }{x}$	= -1	<i>≠</i>	$\lim_{x \to 0^+} \frac{\left x \right }{x}$	$\frac{ x }{x} = 1$	
1					
No existe $\lim_{x\to 0} \frac{ x }{x}$					

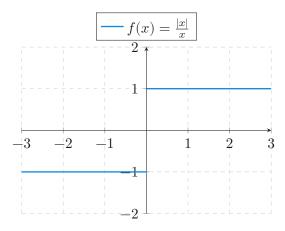


Figura 6.2: Límite que no existe en x=0.

6.1.5 Límites que no existen (III)

A veces, cuando $x \to a$ los valores de f(x) crecen o decrecen infinitamente y entonces no existe el límite. En este caso se dice que la función diverge y se escribe

$$\lim_{x \to a} f(x) = \pm \infty.$$

Ejemplo 6.4. Veamos la tendencia de la función $f(x) = \frac{1}{x^2}$ cuando $x \to 0$:

Por la i		Por la	derecha			
x	f(x)		x	f(x)		
-0.1	100		0.1	100		
-0.01	10000		0.01	10000		
-0.001	1000000		0.001	1000000		
	\downarrow			. ↓		
$\lim_{x \to 0^-} \frac{1}{x^2}$	$\frac{1}{2} = +\infty$		$\lim_{x \to 0^+} \frac{1}{x}$	$\frac{1}{c^2} = +\infty$		
		$\widetilde{\Downarrow}$				
	No existe	$\lim_{r\to 0}$	$\frac{1}{r^2} = \infty$	O		
	•	w 70	a.			
	$\boxed{ f(x) = \frac{1}{x^2}}$					
	J (<i>x</i>) -	x ²			
	*					
	/ - \					
	· / <u>1</u> ·	+-				
-3 -2	-1	+	1	$\stackrel{\longrightarrow}{2}$ 3		
¬ 3 <i>¬</i> 2	-1		1	2 3		
Li_	·iii					

Figura 6.3: Límite que no existe en x=0.

6.1.6 Límites que no existen (IV)

A veces, el límite de un función en un punto puede no existir porque la función oscila rápidamente al acercarnos a dicho punto.

Ejemplo 6.5. Consideremos la función $f(x) = \sin \frac{1}{x}$ y veamos que pasa cuando $x \to 0$:

Por la i		Por la	derecha	
x			x	f(x)
-0.1	-0.1736		0.1	0.1736
-0.01	-0.9848		0.01	0.9848
-0.005	0.3420		0.005	-0.3420
-0.001	0.9848		0.001	-0.9848
-0.0005	0.3420		0.0005	-0.3420
-0.0001	0.9848		0.0001	-0.9848
1)			↓
No existe	$\lim_{x \to 0^{-}} \operatorname{sen} \frac{1}{x}$	N	No existe	$\lim_{x \to 0^+} \operatorname{sen} \frac{1}{x}$
No existe $\lim_{x\to 0} \sin \frac{1}{x}$ $-f(x) = \sin(\frac{1}{x})$ 2 -2 -1 1 2				

Figura 6.4: Límite que no existe en x = 0.

6.1.7 Límites en el infinito

Si f(x) tiende a l cuando x crece infinitamente, entonces se dice que l es el *límite en el infinito* de f(x) cuando $x \to +\infty$, y se escribe

$$\lim_{x\to +\infty} f(x) = l.$$

Si f(x) tiende a l cuando x decrece infinitamente, entonces se dice que l es el *límite en el infinito* de f(x) cuando $x \to -\infty$, y se escribe

$$\lim_{x\to -\infty} f(x) = l.$$

Ejemplo 6.6. Estudiemos la tendencia de $f(x) = \frac{1}{x}$ cuando $x \to \pm \infty$:

$x \to +\infty$	$x \to -\infty$
$x \mid f(x) = 1/x$	$\boxed{ \qquad x \mid f(x) = 1/x }$
1000 0.001	-1000 -0.001
10000 0.0001	-10000 -0.0001
100000 0.00001	-100000 -0.00001
	
$\lim_{x \to +\infty} \frac{1}{x} = 0$	$\lim_{x \to -\infty} \frac{1}{x} = 0$

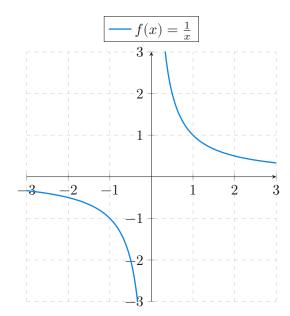


Figura 6.5: Límites en el infinito.

6.2 Definición de límite

Definición 6.1 (Límite de una función en un punto). Dado un conjunto $A\subseteq\mathbb{R}$, una función $f:A\to\mathbb{R}$ y un punto de acumulación a de A, se dice que $l\in\mathbb{R}$ es el *límite* de f en a y se escribe

$$\lim_{x\to a} f(x) = l$$

si para cualquier número $\varepsilon > 0$ existe un número $\delta > 0$ tal que $|f(x) - l| < \varepsilon \ \forall x \in A \ \{a\}$ $con |x - a| < \delta.$



Figura 6.6: Límite de una función.

Advertencia

Obsérvese que en la definición anterior $x \neq a$, es decir, no es necesario que |f(a)| $|l|<\varepsilon$.

Ejemplo 6.7. Sea $f(x)=x^2$. Veamos que $\lim_{n\to a}f(x)=a^2$. Para ello, dado cualquier $\varepsilon>0$ se puede tomar $\delta=\min\{1,\frac{\varepsilon}{1+2|a|}\}>0$ de manera $\forall x\neq a$ si $|x-a|<\delta$, entonces |x-a| < 1 y, por tanto, $|x+a| = |x-a| < 2a| \le |x-a| + 2|a| < 1 + 2|a|$, y además,

$$\begin{split} |f(x)-a^2| &= |x^2-a^2| = |(x+a)(x-a)| = |x+a||x-a|\\ &< (1+2|a|)\delta < (1+2|a|)\frac{\varepsilon}{1+2|a|} = \varepsilon. \end{split}$$

Teorema 6.1 (Unicidad del límite). Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$, una función $f: A \to \mathbb{R}$ y un punto de acumulación a de A, si existe el límite de f en a, entonces es único.

i Demostración

Demostraci'on. Haremos la prueba por reducci\'on al absurdo. Supongamos que l_1 y l_2 son límites de fen a,y que $l_1\neq l_2.$ Entonces, existen $\varepsilon_1>0$ y $\varepsilon_2>0$ tales que $(l_1-\varepsilon_1,l_1+\varepsilon_1)\cap (l_2-\varepsilon_2,l_2+\varepsilon_2)=\emptyset.$

 $\operatorname{Como} \lim_{x \to a} f(x) = l_1, \text{ existe } \delta_1 > 0 \text{ tal que, } \forall x \in A \ \{a\} \text{ con } |x-a| < \delta_1 \text{ se tiene}$ que $f(x) \in (l_1 - \varepsilon_1, l_1 + \varepsilon_1)$.

Del mismo modo, como $\lim_{x\to a} f(x) = l_2$, existe $\delta_2 > 0$ tal que, $\forall x \in A \ \{a\}$ con

$$\begin{split} |x-a| &< \delta_2 \text{ se tiene que } f(x) \in (l_2-\varepsilon_2, l_2+\varepsilon_2). \\ \text{Tomando ahora } \delta = \min\{\delta_1, \delta_2\}, \text{ se tiene que si } x \in A \quad \{a\} \text{ y } |x-a| < \delta, \ f(x) \in (l_1-\varepsilon_1, l_1+\varepsilon_1) \text{ y } f(x) \in (l_2-\varepsilon_2, l_2+\varepsilon_2), \text{ lo que contradice que } (l_1-\varepsilon_1, l_1+\varepsilon_1) \cap (l_2-\varepsilon_2, l_2+\varepsilon_2) = \emptyset. \text{ Por consiguiente, tiene que ser } l_1 = l_2. \\ \end{split}$$

Teorema 6.2 (Criterio de las sucesiones). Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$, una función $f: A \to \mathbb{R}$ y un punto de acumulación a de A, se cumple que $\lim_{x\to a} f(x) = l$ si y solo si para cualquier sucesión $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ en A $\{a\}$ que converge a a, se tiene que $(f(x_n))_{n=1}^{\infty}$ converge a l.

i Demostración

 $\begin{array}{ll} \textit{Demostraci\'on.} \text{ Supongamos que } \lim_{x\to a} f(x) = l \text{ y sea } (x_n)_{n=1}^{\infty} \text{ una sucesi\'on en } A \ \{a\} \text{ que converge a } a. \text{ Veamos que } (f(x_n))_{n=1}^{\infty} \text{ converge a } l. \text{ Dado } \varepsilon > 0, \text{ como } \lim_{x\to a} f(x) = l \text{ existe } \delta > 0 \text{ tal que } \forall x \in A \ \{a\} \text{ con } |x-a| < \delta \text{ se tiene } |f(x)-l| < \varepsilon. \text{ Por otro lado, como } \lim_{n\to\infty} x_n = a, \text{ para este } \delta \text{ existe } k \in \mathbb{N} \text{ tal que } |x_n-a| < \delta \ \forall n \geq k. \end{array}$

Así pues, si $n \geq k$, como $x_n \in A \ \{a\}$ y $|x_n - a| < \delta$, se tiene que $|f(x_n) - l| < \varepsilon$. Por tanto, $\lim_{x \to a} f(x_n) = l$.

Para probar el otro sentido de la implicación, utilizaremos la reducción al absurdo. Supongamos que para cualquier sucesión $(x_n)_{n=1}^\infty$ en A $\{a\}$ se tiene que $\lim_{n\to\infty} f(x_n) = l$, pero $\lim_{x\to a} f(x) \neq l$. Entonces, existe $\varepsilon > 0$ tal que $\forall \delta > 0$ existe $x_\delta \in A$ $\{a\}$ con $|x_\delta - a| < \delta$, pero $|f(x_\delta) - l| \ge \varepsilon$. En particular, para cada $n \in \mathbb{N}$, tomando $\delta = \frac{1}{n}$ y $x_n = x_\delta$, se construye una sucesión $(x_n)_{n=1}^\infty$ que converge a a pero tal que $(f(x_n))_{n=1}^\infty$ no converge a l, lo que contradice que $\lim_{x\to a} f(x_n) = l$. Por tanto, se tiene que cumplir que $\lim_{x\to a} f(x) = l$.

Importante

Este criterio se puede utilizar tanto para demostrar que un número es el límite de una función en un punto como, para demostrar que no lo es.

Ejemplo 6.8. Sea $f(x) = \frac{1}{x} \ \forall x \neq 0 \ \text{y}$ sea $a \neq 0$. Entonces, para cualquier sucesión $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ convergente a a con $x_n \neq 0 \ \forall n \in \mathbb{N}$, se tiene

$$\lim_{n\to\infty}f(x_n)=\lim_{n\to\infty}\frac{1}{x_n}=\frac{\lim_{n\to\infty}1}{\lim_{n\to\infty}x_n}=\frac{1}{a},$$

por lo que, aplicando el criterio anterior se tiene $\lim_{x\to a} f(x) = \frac{1}{a}$.

Del mismo modo, si a=0, tomando la sucesión $\left(\frac{1}{n}\right)_{n=1}^{\infty}$ que converge a 0, $\lim_{n\to\infty} f\left(\frac{1}{n}\right)=\lim_{n\to\infty} n=\infty$, por lo que no existe $\lim_{x\to 0} f(x)$.

Ejemplo 6.9. Sea $f(x) = \operatorname{sen}\left(\frac{1}{x}\right) \ \forall x \neq 0$. Tomando la sucesión $\left(\frac{1}{n\pi}\right)_{n=1}^{\infty}$, que converge a 0, se tiene que

$$\lim_{n \to \infty} f\left(\frac{1}{n\pi}\right) = \lim_{n \to \infty} \operatorname{sen}\left(\frac{1}{\frac{1}{n\pi}}\right) = \lim_{n \to \infty} \operatorname{sen}(n\pi) = 0.$$

Y tomando la sucesión $\left(\frac{1}{2n\pi+\pi/2}\right)_{n=1}^{\infty}$, que también converge a 0, se tiene que

$$\lim_{n\to\infty} f\left(\frac{1}{2n\pi+\pi/2}\right) = \lim_{n\to\infty} \operatorname{sen}\left(\frac{1}{\frac{1}{2n\pi+\pi/2}}\right) = \lim_{n\to\infty} \operatorname{sen}(2n\pi+\pi/2) = 1.$$

Por tanto, el límite de la función aplicada a estas dos sucesiones es distinto, y por el criterio anterior, no existe el límite de f en 0.

Definición 6.2 (Función acotada en un entorno de un punto). Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$, una función $f: A \to \mathbb{R}$ y un punto de acumulación a de A, se dice que f está acotada en el entorno de a si existe un $\delta > 0$ y un c > 0 tal que $|f(x)| < c \ \forall x \in A$ con $|x - a| < \delta$.

Definición 6.3 (Función acotada). Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$, una función $f : A \to \mathbb{R}$, se dice que f está acotada en A, si existe un c > 0 tal que $|f(x)| \le c \ \forall x \in A$.

Proposición 6.1. Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$, una función $f : A \to \mathbb{R}$ y un punto de acumulación a de A, si existe el límite de f en a, entonces f está acotada en un entorno de a.

i Demostración

Demostraci'on. Sea $\lim_{x\to a} f(x) = l$. Entonces, dado $\varepsilon = 1$ existe $\delta > 0$ tal que $|f(x) - l| < 1 \ \forall x \in A \ \{a\}$ con $|x - a| < \delta$, y por tanto,

$$|f(x)| = |f(x) - l + l| \le |f(x) - l| + |l| < 1 + |l|$$

 $\forall x \in A \ \{a\} \ \mathrm{con} \ |x-a| < \delta.$

Tomando ahora $c = \max\{1 + |l|, |f(a)|\}$, se tiene que $|f(x)| < c \ \forall x \in A$ con $|x - a| < \delta$, y por tanto, f está acotada en un entorno de a.

Ejemplo 6.10. La función $f(x) = \frac{1}{x}$ no está acotada en un entorno de 0, por lo que no existe el límite de f en 0.

6.3 Álgebra de límites

Proposición 6.2. Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$, dos funciones $f, g : A \to \mathbb{R}$ y un punto de acumulación a de A, tales que existe $\lim_{x\to a} f(x)$ y $\lim_{x\to a} g(x)$, entonces se cumple que

- 1. $\lim_{x\to a} cf(x) = c \lim_{x\to a} f(x), \ \forall c \in \mathbb{R}.$
- 2. $\lim_{x\to a} (f(x) \pm g(x)) = \lim_{x\to a} f(x) \pm \lim_{x\to a} g(x)$.
- 3. $\lim_{x\to a} (f(x) \cdot g(x)) = \lim_{x\to a} f(x) \cdot \lim_{x\to a} g(x)$.
- 4. Si $g(x) \neq 0 \ \forall x \in A \ y \lim_{x \to a} g(x) \neq 0$, entonces $\lim_{x \to a} \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{\lim_{x \to a} f(x)}{\lim_{x \to a} g(x)}$.

i Demostración

Demostraci'on. Sea $\lim_{x\to a} f(x) = l$ y $\lim_{x\to a} g(x) = m$, y sea $(x_n)_{n=1}^\infty$ una sucesi\'on convergente a a. Entonces $\lim_{x\to a} f(x_n) = l$ y $\lim_{x\to a} g(x_n) = m$, y por tanto,

$$\lim_{n\to\infty}(f+g)(x_n)=\lim_{n\to\infty}f(x_n)+g(x_n)=\lim_{n\to\infty}f(x_n)+\lim_{n\to\infty}g(x_n)=l+m,$$

por lo que $\lim_{x\to a} (f+g)(x) = l+m$.

El resto son similares y se dejan como ejercicio.

Ejemplo 6.11. Sea $f(x) = x^3 + x^2 - 2x - 1$, entonces

$$\begin{split} \lim_{x \to 2} f(x) &= \lim_{x \to 2} x^3 + x^2 - 2x - 1 \\ &= \lim_{x \to 2} x^3 + \lim_{x \to 2} x^2 - \lim_{x \to 2} 2x - \lim_{x \to 2} 1 \\ &= 2^3 + 2^2 - 2 * 2 - 1 = 7. \end{split}$$

Sea ahora $g(x) = \frac{x^2 - 4}{3x - 6}$, entonces

$$\begin{split} \lim_{x \to 2} g(x) &= \lim_{x \to 2} \frac{x^2 - 4}{3x - 6} = \lim_{x \to 2} \frac{(x + 2)(x - 2)}{3(x - 2)} \\ &= \lim_{x \to 2} \frac{x + 2}{3} = \frac{\lim_{x \to 2} x + \lim_{x \to 2} 2}{\lim_{x \to 2} 3} \\ &= \frac{2 + 2}{3} = \frac{4}{3}. \end{split} \tag{$x \neq 2$}$$

Teorema 6.3 (Compresión de funciones). Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$, tres funciones $f,g,h:A\to\mathbb{R}$ y un punto de acumulación a de A, si $f(x)\leq g(x)\leq h(x)$ $\forall x\in A$ y $\lim_{x\to a}f(x)=\lim_{x\to a}h(x)=l$, entonces $\lim_{x\to a}g(x)=l$.

i Demostración

 $\begin{array}{l} \textit{Demostraci\'on.} \text{ Sea } (x_n)_{n=1}^{\infty} \text{ una sucesi\'on en } A \quad \{a\} \text{ convergente a } a. \text{ Entonces } f(x_n) \leq g(x_n) \leq h(x_n) \; \forall n \in \mathbb{N} \text{ y adem\'as } \lim_{n \to \infty} f(x_n) = \lim_{n \to \infty} h(x_n) = l. \text{ As\'a pues, por el teorema de compresi\'on de sucesiones, se tiene que } \lim_{n \to \infty} g(x_n) = l, \text{ y por tanto, } \lim_{x \to a} g(x) = l. \end{array}$

Ejemplo 6.12. Sea $f(x) = x \operatorname{sen}\left(\frac{1}{x}\right) \ \forall x \neq 0$. Entonces $0 \leq \left|x \operatorname{sen}\left(\frac{1}{x}\right)\right| \leq |x| \ \forall x \neq 0$. Como $\lim_{x \to 0} |x| = 0$, aplicando el teorema de compresión de funciones se tiene que $\lim_{x \to 0} \left|x \operatorname{sen}\left(\frac{1}{x}\right)\right| = 0$ y por tanto $\lim_{x \to 0} x \operatorname{sen}\left(\frac{1}{x}\right) = 0$.

Proposición 6.3. Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$, una función $f : A \to \mathbb{R}$ y un punto de acumulación a de A, si existe el límite de f en a entonces $\lim_{x\to a} |f(x)| = |\lim_{x\to a} f(x)|$.

i Demostración

 $\begin{array}{l} \textit{Demostraci\'on.} \text{ Sea } \lim_{x\to a} f(x) = l. \text{ Por las propiedades del valor absoluto se cumple que } 0 \leq ||f(x)| - |l|| \leq |f(x) - l| \; \forall x \in A. \text{ Como adem\'as } \lim_{x\to a} |f(x) - l| = 0, \\ \text{por el teorema de compresi\'on de funciones se tiene que} \end{array}$

$$\lim_{x\to a}||f(x)|-|l||=0\Rightarrow \lim_{x\to a}|f(x)|-|l|=0\Rightarrow \lim_{x\to a}|f(x)|=|l|.$$

Proposición 6.4. Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$, una función $f : A \to \mathbb{R}$ y un punto de acumulación a de A, si existe el límite de f en a entonces $\lim_{x\to a} \sqrt{f(x)} = \sqrt{\lim_{x\to a} f(x)}$.

i Demostración

Demostración. Se deja como ejercicio.

Teorema 6.4 (Criterio de Cauchy). Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$, una función $f: A \to \mathbb{R}$ y un punto de acumulación a de A, entonces $\lim_{x\to a} f(x) = l$ si y solo si para cualquier $\varepsilon > 0$ existe un $\delta > 0$ tal que $|f(x) - f(y)| < \varepsilon \ \forall x,y \in A \ \{a\}$ con $|x-a| < \delta|$ y $|y-a| < \delta$.

i Demostración

Demostraci'on. Supongamos que $\lim_{x\to a}f(x)=l.$ Entonces, dado $\varepsilon>0,$ existe $\delta>0$ tal que $|f(x)-l|<\frac{\varepsilon}{2}\ \forall x\in A\ \{a\}\ {\rm con}\ |x-a|<\delta.$ Por tanto, para cualquier $x,y\in A\ \{a\}\ {\rm con}\ |x-a|<\delta$ y $|y-a|<\delta$ se tiene

$$|f(x)-f(y)|=|f(x)-l+l-f(y)|\leq |f(x)-l|+|l-f(y)|<\frac{\varepsilon}{2}+\frac{\varepsilon}{2}=\varepsilon.$$

Para probar el otro sentido de la implicación, supongamos que para cualquier $\varepsilon > 0$, existe $\delta > 0$ tal que $|f(x) - f(y)| < \varepsilon \ \forall x, y \in A \ \{a\} \ \text{con} \ |x - a| < \delta | \ \text{y} \ |y - a| < \delta$. Sea $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ una sucesión en $A \ \{a\}$ convergente a a. Entonces existe $k \in \mathbb{N}$ tal que $|x_n - a| < \delta \ \forall n \geq k$, y por tanto, $|f(x_n) - f(x_m)| < \varepsilon \ \forall m, n \geq k$. Así pues, $(f(x_n))_{n=1}^{\infty}$ es una sucesión de Cauchy y por el criterio de convergencia de Cauchy para sucesiones (Teorema 4.8), existe $l \in \mathbb{R}$ tal que $\lim_{n \to \infty} f(x_n) = l$.

Veamos ahora que l es el límite de f en a, usando el criterio de las sucesiones. Sea $(y_n)_{n=1}^{\infty}$ otra una sucesión en A $\{a\}$ convergente a a. Por el mismo razonamiento de

antes, se tiene que existe $l' \in \mathbb{R}$ tal que $\lim_{n \to \infty} f(y_n) = l'$. Tomando ahora $\varepsilon > 0$ y $\delta > 0$ de antes, existe $k \in \mathbb{N}$ tal que $|x_n - a| < \delta$ y $|y_n - a| < \delta$ $\forall n \geq k$, de manera que $|f(x_n) - f(y_n)| < \varepsilon$ $\forall n \geq k$. Así pues,

$$\lim_{n\to\infty}|f(x_n)-f(y_n)|=|\lim_{n\to\infty}f(x_n)-\lim_{n\to\infty}f(y_n)|=|l-l'|<\varepsilon.$$

Y como esto es cierto para cualquier $\varepsilon > 0$ se concluye que l = l', es decir, para cualquier sucesión $(y_n)_{n=1}^\infty$ en A $\{a\}$ convergente a a, se tiene $\%\lim_{n\to\infty} f(y_n) = l$, por lo que se concluye que $\lim_{x\to a} f(x) = l$.

6.4 Límites laterales

Definición 6.4. Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$ y una función $f: A \to \mathbb{R}$,

- 1. Si a es un punto de acumulación de $\{x \in A : x > a\}$, se dice que l es el *límite por la derecha* de f en a y se denota $\lim_{x \to a^+} f(x) = l$, si para cualquier $\varepsilon > 0$ existe $\delta > 0$ tal que $|f(x) l| < \varepsilon \ \forall x \in A \ \text{con} \ 0 < x a < \delta$.
- 2. Si a es un punto de acumulación de $\{x \in A : x < a\}$, se dice que l es el *límite por la izquierda* de f en a y se denota $\lim_{x \to a^-} f(x) = l$, si para cualquier $\varepsilon > 0$ existe $\delta > 0$ tal que $|f(x) l| < \varepsilon \ \forall x \in A \ \text{con} \ 0 < a x < \delta$.

Teorema 6.5 (Límites laterales). Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$ y una función $f: A \to \mathbb{R}$, y sea a un punto de acumulación de los conjuntos $\{x \in A: x > a\}$ y $\{x \in A: x < a\}$, entonces $\lim_{x\to a} f(x) = l$ si y solo si $\lim_{x\to a^+} f(x) = \lim_{x\to a^-} f(x) = l$.

Demostración

 $\begin{array}{l} \textit{Demostraci\'on}. \text{ Sea } \lim_{x\to a} f(x) = l. \text{ Entonces, dado } \varepsilon > 0 \text{ existe } \delta > 0 \text{ tal que } \\ |f(x)-l| < \varepsilon \; \forall x \in A \; \left\{a\right\} \text{ con } |x-a| < \delta. \text{ As\'i pues, si } x \in A \text{ y } 0 < x-c < \delta \text{ se tiene que } |f(x)-l| < \varepsilon \text{ por lo que } \lim_{x\to a^+} f(x) = l, \text{ y si } x \in A \text{ y } 0 < c-x < \delta \text{ tambi\'en se tiene que } |f(x)-l| < \varepsilon \text{ por lo que } \lim_{x\to a^-} f(x) = l. \end{array}$

Para probar el otro sentido de la implicación, supongamos ahora que $\lim_{x\to a^+} f(x) = \lim_{x\to a^-} f(x) = l$. Entonces, dado $\varepsilon>0$, existe $\delta_1>0$ tal que $|f(x)-l|<\varepsilon \ \forall x\in A$ con $0< x-c<\delta_1$, y también existe $\delta_2>0$ tal que $|f(x)-l|<\varepsilon \ \forall x\in A$ con $0< c-x<\delta_2$. Así pues, tomando $\delta=\min\{\delta_1,\delta_2\}$, para cualquier $x\in A$ $\{a\}$ con $|x-a|<\delta$, si x>a se tiene que $0< x-a<\delta<\delta_1$ y, por tanto, $|f(x)-l|<\varepsilon$. Y si

x < a se tiene que $0 < a-x < \delta < \delta_2$ y, por tanto, $|f(x)-l| < \varepsilon.$ Por consiguiente, $\lim_{x \to a} f(x) = l.$

Ejemplo 6.13. Sea

$$f(x) = \frac{|x|}{x} = \begin{cases} -1 & \text{si } x < 0\\ 1 & \text{si } x > 0 \end{cases}$$

Entonces, $\lim_{x\to 0^-} f(x) = -1$ y $\lim_{x\to 0^+} f(x) = 1$, y como los límites son distintos, por el teorema anterior, se tiene que no existe el límite de la función en 0.

6.5 Límites infinitos

Definición 6.5 (Límite infinito). Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$ y una función $f : A \to \mathbb{R}$, y sea a un punto de acumulación de A:

- 1. Se dice que f tiende a ∞ cuando x tiende a a, y se denota $\lim_{x\to a} f(x) = \infty$, si para cada $\varepsilon > 0$ existe un $\delta > 0$ tal que $f(x) > \varepsilon \ \forall x \in A \ \{a\} \ \text{con} \ |x-a| < \delta$.
- 2. Se dice que f tiende a $-\infty$ cuando x tiende a a, y se denota $\lim_{x\to a} f(x) = -\infty$, si para cada $\varepsilon < 0$ existe un $\delta > 0$ tal que $f(x) < \varepsilon \ \forall x \in A \ \{a\} \ \text{con} \ |x-a| < \delta$.

Ejemplo 6.14. Sea $f(x) = \frac{1}{x^2}$. Dado $\varepsilon > 0$, tomando $\delta = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} > 0$, se tiene que si $0 < |x| < \delta = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}$ entonces

$$f(x) = \frac{1}{x^2} > \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}\right)^2} = \varepsilon.$$

Por tanto, $\lim_{x\to 0} f(x) = \infty$.

Proposición 6.5. Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$, un punto de acumulación a de A y dos funciones $f, g: A \to \mathbb{R}$ tales que $f(x) \leq g(x) \ \forall x \in A \ \{a\}$:

- 1. $Si \lim_{x\to a} f(x) = \infty$ entonces $\lim_{x\to a} g(x) = \infty$.
- 2. $Si \lim_{x \to a} g(x) = -\infty$ entonces $\lim_{x \to a} f(x) = -\infty$.

i Demostración

 $\begin{array}{ll} \textit{Demostraci\'on.} \text{ Supongamos que } \lim_{x\to a} f(x) = \infty. \text{ Entonces dado } \varepsilon > 0 \text{ existe} \\ \delta > 0 \text{ tal que } f(x) > \varepsilon \ \forall x \in A \ \{a\} \text{ con } |x-a| < \delta, \text{ y como } f(x) \leq g(x) \\ \forall x \in A \ \{a\} \text{ tambi\'en tiene que } g(x) \geq f(x) > \varepsilon, \text{ por lo que } \lim_{x\to a} g(x) = \infty. \\ \text{La segunda parte se prueba de forma an\'aloga.} \end{array}$

6.6 Límites en el infinito

Definición 6.6 (Límite de una función en el infinito). Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$ tal que $(a, \infty) \subset A$ para algún $a \in \mathbb{R}$, y una función $f : A \to \mathbb{R}$, se dice que f tiende a l cuando x tiende ∞ , y se denota $\lim_{x\to\infty} f(x) = l$, si para cada $\varepsilon > 0$ existe $\delta > a$ tal que $|f(x) - l| < \varepsilon \ \forall x > \delta$.

Y dado un conjunto $B \subseteq \mathbb{R}$ tal que $(-\infty, b) \subset B$ para algún $b \in \mathbb{R}$, y una función $g: B \to \mathbb{R}$, se dice que g tiende a l cuando x tiende $-\infty$, y se denota $\lim_{x \to -\infty} g(x) = l$, si para cada $\varepsilon > 0$ existe $\delta < b$ tal que $|f(x) - l| < \varepsilon \ \forall x < \delta$.

Ejemplo 6.15. Sea $f(x) = \frac{1}{x} \ \forall x \neq 0$. Veamos que $\lim_{x \to \infty} f(x) = 0$. Dado $\varepsilon > 0$ existe $\delta = \frac{1}{\varepsilon} > 0$ tal que si $x > \delta = \frac{1}{\varepsilon}$ se tiene $|f(x) - 0| = |f(x)| = \left|\frac{1}{x}\right| < \varepsilon$.

Del mismo modo se puede probar que $\lim_{x\to-\infty} f(x) = 0$.

Teorema 6.6 (Criterio de las sucesiones divergentes). Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$ tal que $(a, \infty) \subset A$ para algún $a \in \mathbb{R}$, y una función $f : A \to \mathbb{R}$, entonces $\lim_{x \to \infty} f(x) = l$ si y solo si para cualquier sucesión $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ en (a, ∞) que diverja $a \infty$, $\lim_{n \to \infty} f(x_n) = l$.

i Demostración

Demostraci'on. Supongamos que $\lim_{x\to\infty}f(x)=l.$ Entonces, dado $\varepsilon>0$ existe $\delta>a$ tal que $|f(x)-l|<\varepsilon\ \forall x>\delta.$

Por otro lado, como $\lim_{n\to\infty}x_n=\infty$, existe $k_\delta\in\mathbb{N}$ tal que $x_n>\delta$ $\forall n\geq k_\delta$. Así pues, si $n\geq k_\delta$ se tiene que como $x_n\in A$ y $x_n>\delta$, $|f(x_n)-l|<\varepsilon$, por lo que $\lim_{x\to\infty}f(x_n)=l$.

Para ver el otro sentido de la implicación, procederemos por reducción al absurdo. Supongamos que ahora que para cualquier $(x_n)_{n=1}^\infty$ en (a,∞) que diverja a ∞ , $\lim_{n\to\infty} f(x_n) = l$, pero $\lim_{x\to\infty} f(x) \neq l$. Entonces existe $\varepsilon>0$ tal que para cualquier $\delta>a$ existe $x_\delta>\delta$ con $|f(x_\delta)-l|\geq \varepsilon$.

Así, para cada $n \in \mathbb{N}$ existe $x_n > a$ tal que $x_n > n$ y $|f(x_n) - l| \ge \varepsilon$. Entonces $(x_n)_{n=1}^\infty$ es una sucesión en $(a\infty) \subset A$ que diverge a ∞ y tal que $(f(x_n))_{n=1}^\infty$ no converge a l, lo que contradice la hipótesis de partida. Por consiguiente, debe ser $\lim_{x\to\infty} f(x) = l$.

Definición 6.7 (Límite infinito en el infinito). Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$ tal que $(a, \infty) \subset A$ para algún $a \in \mathbb{R}$, y una función $f: A \to \mathbb{R}$, se dice que f tiende a ∞ cuando x tiende ∞ , y se denota $\lim_{x \to \infty} f(x) = \infty$, si para cada $\varepsilon > 0$ existe $\delta > a$ tal que $f(x) > \varepsilon$ $\forall x > \delta$.

Y dado un conjunto $B \subseteq \mathbb{R}$ tal que $(-\infty, b) \subset B$ para algún $b \in \mathbb{R}$, y una función $g: B \to \mathbb{R}$, se dice que g tiende a ∞ cuando x tiende $-\infty$, y se denota $\lim_{x \to -\infty} g(x) = \infty$, si para cada $\varepsilon > 0$ existe $\delta < b$ tal que $f(x) < \varepsilon \ \forall x < \delta$.

Ejemplo 6.16. Sea $f(x) = x^2$. Veamos que $\lim_{x\to\infty} f(x) = \infty$. Dado $\varepsilon > 0$ existe $\delta = \sqrt{\varepsilon} > 0$ tal que si $x > \delta$, entonces $f(x) = x^2 > (\sqrt{\varepsilon})^2 = \varepsilon$.

Del mismo modo se puede probar que $\lim_{x\to-\infty} f(x) = \infty$.

Proposición 6.6. Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$ tal que $(a, \infty) \subset A$ para algún $a \in \mathbb{R}$, y dos funciones $f, g: A \to \mathbb{R}$, tales que $g(x) > 0 \ \forall x \in A \ y \ \lim_{x \to \infty} \frac{f(x)}{g(x)} = l$, entonces:

- 1. Si l > 0, $\lim_{x \to \infty} f(x) = \infty$ si y solo si $\lim_{x \to \infty} g(x) = \infty$.
- 2. Si l < 0, $\lim_{x \to \infty} f(x) = -\infty$ si y solo si $\lim_{x \to \infty} g(x) = \infty$.

i Demostración

Demostración. Supongamos que $\lim_{x\to\infty}\frac{f(x)}{g(x)}=l>0.$ Entonces, dado $\varepsilon=\frac{l}{2}>0$

existe $\delta > a$ tal que $\left| \frac{f(x)}{g(x)} - l \right| < \varepsilon = \frac{l}{2} \ \forall x > \delta$. Así pues, si $x > \delta$ se tiene

$$\begin{split} \left| \frac{f(x)}{g(x)} - l \right| < \frac{l}{2} \Rightarrow \frac{-l}{2} < \frac{f(x)}{g(x)} - l < \frac{l}{2} \\ \Rightarrow \frac{l}{2} < \frac{f(x)}{g(x)} < \frac{3l}{2} \\ \Rightarrow \frac{l}{2} g(x) < f(x) < \frac{3l}{2} g(x). \end{split}$$

Por tanto, por la Proposición 6.5 se tiene que si $\lim_{x\to\infty}g(x)=\infty$ entonces $\lim_{x\to\infty}f(x)=\infty$ y si $\lim_{x\to\infty}f(x)=\infty$ entonces $\lim_{x\to\infty}g(x)=\infty$. La segunda parte se prueba de forma análoga.

6.7 Límites de las funciones elementales

Proposición 6.7 (Límite de una función polinómica). Si f es una función polinómica, entonces existe el límite de f en cualquier punto $a \in \mathbb{R}$ y $\lim_{x\to a} f(x) = f(a)$.

i Demostración

Demostración. Se deja como ejercicio.

Proposición 6.8 (Límite de una función racional). Si $f(x) = \frac{p(x)}{q(x)}$ con p(x) y q(x) funciones polinómicas, entonces existe el límite de f en cualquier punto $a \in \mathbb{R}$ que no sea una raíz de q(x), y $\lim_{x\to a} f(x) = f(a)$.

Si a es una raíz de q(x) entonces el límite puede existir o no.

i Demostración

Demostración. Se deja como ejercicio.

Proposición 6.9 (Límite de una función potencial). Si $f(x) = x^r \text{ con } r \in \mathbb{R}$, entonces existe el límite de f en cualquier punto a tal que exista un intervalo $(a-\delta, a+\delta) \subset Dom(f)$ para algún $\delta > 0$, y en ese caso, $\lim_{x\to a} f(x) = f(a)$.

i Demostración

Demostración. Se deja como ejercicio.

Proposición 6.10 (Límite de una función exponencial). $Si\ f(x) = c^x\ con\ c \in \mathbb{R}$ entonces existe el límite de f en cualquier punto $a \in \mathbb{R}$ $y \lim_{x \to a} f(x) = f(a)$.

i Demostración

Demostración. Se deja como ejercicio.

Proposición 6.11 (Límite de una función logarítmica). Si $f(x) = \log_c(x)$ con $c \in \mathbb{R}$, entonces existe el límite de f en cualquier punto $a \in \mathbb{R}^+$ y $\lim_{x \to a} f(x) = f(a)$.

i Demostración

Demostración. Se deja como ejercicio.

Proposición 6.12. Si f(x) es una función trigonométrica, entonces existe el límite de f en cualquier punto $a \in Dom(f)$ y $\lim_{x\to a} f(x) = f(a)$.

i Demostración

Demostraci'on. Se deja como ejercicio.

6.8 Indeterminaciones y su resolución

6.8.1 Tipos de indeterminaciones

Al calcular límites pueden aparecer las siguientes indeterminaciones:

- Tipo cociente. Si $\lim_{x\to a} f(x) = 0$ y $\lim_{x\to a} g(x) = 0$, entonces $\frac{f(x)}{g(x)}$ presenta una indeterminación del tipo $\frac{0}{0}$ cuando $x\to a$.
 - Si $\lim_{x\to a} f(x) = \pm \infty$ y $\lim_{x\to a} g(x) = \pm \infty$, entonces $\frac{f(x)}{g(x)}$ presenta una indeterminación del tipo $\pm \frac{\infty}{\infty}$ cuando $x\to a$.
- Tipo producto. Si $\lim_{x\to a} f(x) = 0$ y $\lim_{x\to a} g(x) = \pm \infty$, entonces $f(x)\cdot g(x)$ presenta una indeterminación del tipo $0\cdot \pm \infty$ cuando $x\to a$.
- Tipo potencia. Si $\lim_{x\to a} f(x) = 1$ y $\lim_{x\to a} g(x) = \infty$, entonces $f(x)^{g(x)}$ presenta una indeterminación del tipo 1^{∞} cuando $x\to a$.
 - Si $\lim_{x\to a} f(x) = 0$ y $\lim_{x\to a} g(x) = 0$, entonces $f(x)^{g(x)}$ presenta una indeterminación del tipo 0^0 cuando $x\to a$.
 - Si $\lim_{x\to a} f(x) = \infty$ y $\lim_{x\to a} g(x) = 0$, entonces $f(x)^{g(x)}$ presenta una indeterminación del tipo ∞^0 cuando $x\to a$.
- Tipo diferencia. Si $\lim_{x\to a} f(x) = \infty$ y $\lim_{x\to a} g(x) = \infty$, entonces f(x) g(x) presenta una indeterminación del tipo $\infty \infty$ cuando $x \to a$.

6.8.2 Resolución de una indeterminación de tipo cociente

Existen diferentes técnicas para resolver una indeterminación del tipo $\frac{0}{0}$ o $\frac{\infty}{\infty}$:

- Factorización de polinomios en funciones racionales.
- División por el términos de mayor orden en funciones racionales.
- Infinitésimos equivalentes.
- Regla de L'Hôpital.

6.8.2.1 Factorización de polinomios en funciones racionales

Si $f(x) = \frac{p(x)}{q(x)}$ es una función racional que presenta una indeterminación de tipo cociente cuando $x \to a$, y a es una raíz de p(x) y q(x), se puede resolver la indeterminación factorizando los polinomios y simplificando.

Ejemplo 6.17. La función
$$f(x) = \frac{x^3 - 3x + 2}{x^4 - 4x + 3} \to \frac{0}{0}$$
 cuando $x \to 1$.

Para resolver la indeterminación factorizamos los polinomios

$$x^3 - 3x + 2 = (x+2)(x-1)^2,$$

 $x^4 - 4x + 3 = (x^2 + 2x + 3)(x-1)^2.$

Como el factor $(x-1)^2$ es común, podemos simplificar la función en el cálculo del límite:

$$\lim_{x \to 1} \frac{x^3 - 3x + 2}{x^4 - 4x + 3} = \lim_{x \to 1} \frac{(x+2)(x-1)^2}{(x^2 + 2x + 3)(x-1)^2} = \lim_{x \to 1} \frac{(x+2)}{(x^2 + 2x + 3)} = \frac{3}{6} = 0.5.$$

6.8.2.2 División por el término de mayor orden en funciones racionales

Si $f(x) = \frac{p(x)}{q(x)}$ es una función racional que presenta una indeterminación de tipo cociente cuando $x \to \pm \infty$, entonces se puede resolver dividendo p(x) y q(x) por el término de mayor grado de ambos polinomios.

Ejemplo 6.18. La función
$$f(x) = \frac{x^3 - 3x + 2}{x^4 - 4x + 3} \to \frac{\infty}{\infty}$$
 cuando $x \to \infty$.

Para resolver la indeterminación dividimos numerador y denominador por x^4 que es el término de mayor grado:

$$\lim_{x \to \infty} \frac{x^3 - 3x + 2}{x^4 - 4x + 3} = \lim_{x \to \infty} \frac{\frac{x^3 - 3x + 2}{x^4}}{\frac{x^4 - 4x + 3}{x^4}} = \lim_{x \to \infty} \frac{\frac{1}{x} - \frac{3}{x^3} + \frac{2}{x^4}}{1 - \frac{4}{x^3} + \frac{3}{x^4}} = \frac{0}{1} = 0$$

En general, si
$$f(x) = \frac{a_0 + a_1 x + \dots + a_n x^n}{b_0 + b_1 x + \dots + b_m x^m}$$
, entonces:

¹Se pude simplificar porque aunque $x \to 1$, $x \neq 1$ y por tanto el denominador no se anula.

- Si n > m entonces $\lim_{x \to \pm \infty} f(x) = \pm \infty$.
- Si n < m entonces $\lim_{x \to \pm \infty} f(x) = 0$.
- Si n = m entonces $\lim_{x \to \pm \infty} f(x) = \frac{a_n}{b_m}$.

6.8.2.3 Infinitésimos equivalentes

Definición 6.8. Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$, una función $f : A \to \mathbb{R}$, y un punto de acumulación a de A, se dice que f es un infinitésimo en a si $\lim_{x\to a} f(x) = 0$.

De manera informal, se puede decir que un infinitésimo es una cantidad infinitamente pequeña.

Ejemplo 6.19. La función identidad f(x)=x es un infinitésimo en x=0, ya que $\lim_{x\to 0}x=0.$

Del mismo modo, la función $g(x)=\sin(x)$ es otro infinitésimo en x=0 ya que $\lim_{x\to 0}\sin(x)=0$.

Y la función $h(x) = x^2 - 4$ es un infinitésimo en x = 2, ya que $\lim_{x \to 2} x^2 - 4 = 0$.

Proposición 6.13 (Propiedades de los infinitésimos). Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$, dos funciones $f, g: A \to \mathbb{R}$, y un punto de acumulación a de A, tales que f y g son infinitésimos en a. Entonces se cumple

- 1. f + g es un infinitésimo en a.
- 2. $f \cdot g$ es un infinitésimo en a.
- 3. $c \cdot f$ es un infinitésimo en a $\forall c \in \mathbb{R}$.
- 4. Si h es una función acotada en un entorno de $a, f \cdot h$ es un infinitésimo en a.

i Demostración

Demostración. Se deja como ejercicio.

Definición 6.9 (Infinitésimos equivalentes). Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$, dos funciones $f, g: A \to \mathbb{R}$, y un punto de acumulación a de A, tales que f y g son infitésimos en a, se dice que f y g son infinitésimos equivalentes en a, se denota $f(x) \approx g(x)$ cuando $x \to a$, si

$$\lim_{x \to a} \frac{f(x)}{g(x)} = 1.$$

Si $f(x) \approx g(x)$ cuando $x \to a$ entonces f(x) y g(x) son magnitudes equivalentes cuando $x \to a$.

Ejemplo 6.20. Los siguientes infinitésimos equivalentes cuando $x \to 0$:

$$sen(x) \approx x \approx tg(x)$$

$$1 - cos(x) \approx \frac{x^2}{2}$$

$$arctg(x) \approx x$$

$$e^x - 1 \approx x$$

$$log(1 + x) \approx x$$

A veces se puede resolver una indeterminación cuando $x \to a$ sustituyendo cualquier subexpresión de la función por un infinitésimo equivalente cuando $x \to a$.

Ejemplo 6.21. La función $f(x) = \frac{\operatorname{sen}(x)(1-\cos(x))}{x^3} \to \frac{0}{0}$ cuando $x \to 0$.

Como $\operatorname{sen}(x) \approx x$ y $1 - \cos(x) \approx \frac{x^2}{2}$ cuando $x \to 0$, para resolver la indeterminación sustituimos $\operatorname{sen}(x)$ por x y $1 - \cos(x)$ por $\frac{x^2}{2}$:

$$\lim_{x\to 0}\frac{\mathrm{sen}(x)(1-\cos(x))}{x^3}=\lim_{x\to 0}\frac{x\frac{x^2}{2}}{x^3}=\lim_{x\to 0}\frac{\frac{x^3}{2}}{x^3}=\lim_{x\to 0}\frac{1}{2}=0.5.$$

6.8.2.4 Regla de L'Hôpital

Teorema 6.7 (Regla de L'Hôpital). Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$, dos funciones $f, g: A \to \mathbb{R}$, y un punto de acumulación a de A, tales que $\frac{f(x)}{g(x)} \to \frac{0}{0}$ o $\frac{\infty}{\infty}$ cuando $x \to a$, entonces si existe $\lim_{x\to a} \frac{f'(x)}{g'(x)}$ se cumple que

$$\lim_{x \to a} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \to a} \frac{f'(x)}{g'(x)}.$$

i Demostración

Demostración. Se verá en el siguiente

▲ Advertencia

Para que exista $\lim_{x\to a} \frac{f'(x)}{g'(x)}$ es necesario que que f y g sean derivables en un entorno de a.

Ejemplo 6.22. Sea
$$f(x) = \frac{\log(x^2 - 1)}{x + 2} \to \frac{\infty}{\infty}$$
 cuando $x \to \infty$.

Para resolver la indeterminación aplicamos la regla de L'Hôpital:

$$\begin{split} \lim_{x \to \infty} \frac{\log(x^2 - 1)}{x + 2} &= \lim_{x \to \infty} \frac{\left(\log(x^2 - 1)\right)'}{\left(x + 2\right)'} = \lim_{x \to \infty} \frac{\frac{2x}{x^2 - 1}}{1} = \\ &= \lim_{x \to \infty} \frac{2x}{x^2 - 1} = \lim_{x \to \infty} \frac{\left(2x\right)'}{\left(x^2 - 1\right)'} = \lim_{x \to \infty} \frac{2}{2x} = 0. \end{split}$$

6.8.3 Resolución de una indeterminación de tipo producto

Si $f(x) \to 0$ y $g(x) \to \pm \infty$ cuando $x \to a$, entonces la indeterminación $f(x) \cdot g(x) \to 0 \cdot \pm \infty$ puede convertirse en una de tipo cociente mediante la transformación:

$$f(x) \cdot g(x) = \frac{f(x)}{1/g(x)} \to \frac{0}{0}.$$

Ejemplo 6.23. Sea $f(x) = x^2 e^{1/x^2} \to 0 \cdot \infty$ cuando $x \to 0$.

$$\lim_{x \to 0} x^2 e^{1/x^2} = \lim_{x \to 0} \frac{e^{1/x^2}}{1/x^2} \to \frac{\infty}{\infty}$$

Aplicando ahora la regla de L'Hôpital tenemos:

$$\lim_{x \to 0} \frac{e^{1/x^2}}{1/x^2} = \lim_{x \to 0} \frac{\left(e^{1/x^2}\right)'}{\left(1/x^2\right)'} = \lim_{x \to 0} \frac{e^{1/x^2} \frac{-2}{x^3}}{\frac{-2}{x^3}} = \lim_{x \to 0} e^{1/x^2} = \infty.$$

6.8.4 Resolución de una indeterminación de tipo potencia

Si $f(x)^{g(x)}$ presenta una indeterminación de tipo potencia cuando $x \to a$, entonces la indeterminación puede convertirse en una de tipo producto mediante la transformación:

$$\exp\left(\log f(x)^{g(x)}\right) = \exp\left(g(x)\cdot \log f(x)\right).$$

Ejemplo 6.24. Sea $f(x) = \left(1 + \frac{1}{x}\right)^x \to 1^{\infty}$ cuando $x \to 0$.

$$\lim_{x \to 0} \left(1 + \frac{1}{x} \right)^x = \lim_{x \to 0} \exp\left(\log\left(1 + \frac{1}{x}\right)^x \right)$$
$$= \exp\left(\lim_{x \to 0} x \log\left(1 + \frac{1}{x}\right) \right)$$
$$= \exp\left(\lim_{x \to 0} \frac{\log\left(1 + \frac{1}{x}\right)}{1/x} \right)$$

Aplicando ahora la regla de L'Hôpital tenemos:

$$\begin{split} \exp\left(\lim_{x\to 0}\frac{\left(\log\left(1+\frac{1}{x}\right)\right)'}{\left(1/x\right)'}\right) &= \exp\left(\lim_{x\to 0}\frac{\frac{1}{1+1/x}\frac{-1}{x^2}}{\frac{-1}{x^2}}\right) \\ &= \exp\left(\lim_{x\to 0}\frac{1}{1+\frac{1}{x}}\right) = \exp(1) = e. \end{split}$$

6.8.5 Resolución de una indeterminación de tipo diferencia

Si $f(x) \to \infty$ y $g(x) \to \infty$ cuando $x \to a$, entonces la indeterminación f(x) - g(x) puede convertirse en una de tipo cociente mediante la transformación:

$$f(x) - g(x) = \frac{\frac{1}{g(x)} - \frac{1}{f(x)}}{\frac{1}{f(x)g(x)}} \to \frac{0}{0}.$$

Ejemplo 6.25. Sea $f(x) = \frac{1}{\operatorname{sen} x} - \frac{1}{x} \to \infty - \infty$ cuando $x \to 0$.

$$\lim_{x \to 0} \frac{1}{\sin x} - \frac{1}{x} = \lim_{x \to 0} \frac{x - \sin x}{x \sin x} \to \frac{0}{0}.$$

Aplicando ahora la regla de L'Hôpital tenemos:

$$\lim_{x \to 0} \frac{x - \sin x}{x \sin x} = \lim_{x \to 0} \frac{(x - \sin x)'}{(x \sin x)'} = \lim_{x \to 0} \frac{1 - \cos x}{\sin x + x \cos x} =$$

$$= \lim_{x \to 0} \frac{(1 - \cos x)'}{(\sin x + x \cos x)'} = \lim_{x \to 0} \frac{\sin x}{\cos x + \cos x - x \sin x} =$$

$$= \frac{0}{2} = 0.$$

6.9 Asíntotas de una función

Una asíntota de una función es una recta a la que tiende la función en el infinito, es decir, que la distancia entre la recta y la función es cada vez menor.

Existen tres tipos de asíntotas:

• Asíntota vertical: x = a,

• Asíntota horizontal: y = a,

• Asíntota oblicua: y = a + bx.

6.9.1 Asíntotas verticales

Definición 6.10 (Asíntota vertical). Se dice que una recta x = a es una asíntota vertical de una función f si se cumple

$$\lim_{x\to a^-}f(x)=\pm\infty\quad \text{o}\quad \lim_{x\to a^-}f(x)=\pm\infty$$

Las asíntotas verticales deben buscarse en los puntos donde no está definida la función, pero si lo está en las proximidades.

Ejemplo 6.26. La recta x=2 es una asíntota vertical de $f(x)=\frac{x+1}{x-2}$ ya que

$$\lim_{x \to 2^-} \frac{x+1}{x-2} = -\infty, \ \ \text{y} \ \ \lim_{x \to 2^+} \frac{x+1}{x-2} = \infty.$$

6.9.2 Asíntotas horizontales

Definición 6.11 (Asíntota horizontal). Se dice que una recta y=a es una asíntota horizontal de una función f si se cumple

$$\lim_{x \to +\infty} f(x) = a \quad \text{o} \quad \lim_{x \to \infty} f(x) = a$$

Ejemplo 6.27. La recta y=1 es una asíntota horizontal de $f(x)=\frac{x+1}{x-2}$ ya que

$$\lim_{x \to -\infty} \frac{x+1}{x-2} = \lim_{x \to -\infty} 1 + \frac{3}{x-2} = 1, \text{ y}$$

$$\lim_{x \to +\infty} \frac{x+1}{x-2} = \lim_{x \to +\infty} 1 + \frac{3}{x-2} = 1.$$

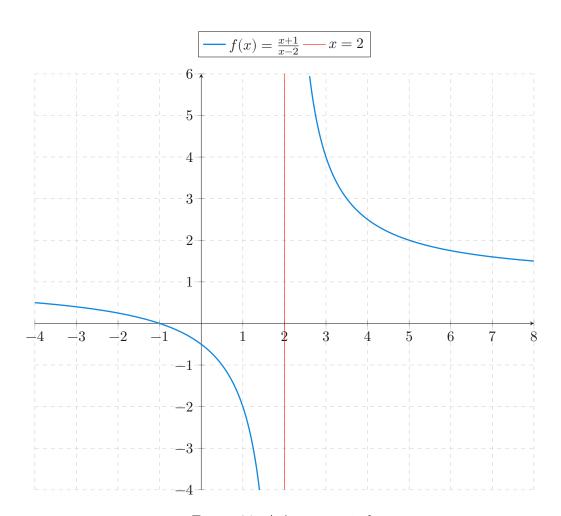


Figura 6.7: Asíntota vertical.

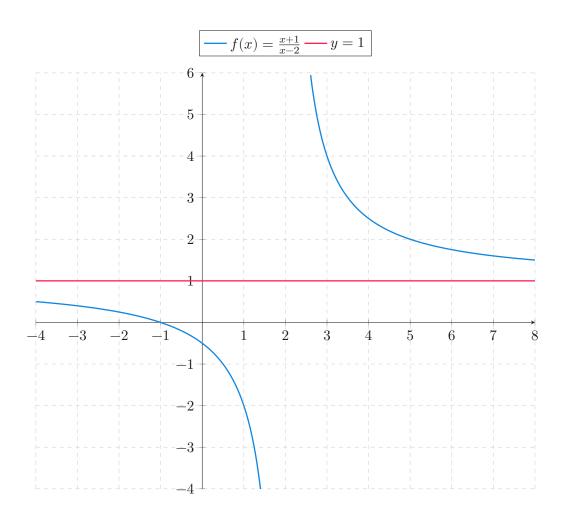


Figura 6.8: Asíntota horizontal.

6.9.3 Asíntotas oblicuas

Definición 6.12 (Asíntota oblicua). Se dice que una recta y = a + bx es una asíntota oblicua de una función f si se cumple

$$\lim_{x\to\pm\infty}\frac{f(x)}{x}=b\quad \text{y}\quad \lim_{x\to\pm\infty}f(x)-bx=a.$$

Ejemplo 6.28. La recta y = x + 1 es una asíntota oblicua de $f(x) = \frac{x^2}{x - 1}$ ya que

$$\lim_{x\to\pm\infty}\frac{\frac{x^2}{x-1}}{x}=\lim_{x\to\pm\infty}\frac{x^2}{x^2-x}=1,\ \mathbf{y}$$

$$\lim_{x\to\pm\infty}\frac{x^2}{x-1}-x=\lim_{x\to\pm\infty}1+\frac{x}{x-1}=1$$

6.10 Continuidad

Definición 6.13 (Función continua en un punto). Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$, una función $f:A \to \mathbb{R}$ y un punto de acumulación a de A, se dice que la función f es continua en el punto a si

$$\lim_{x \to a} f(x) = f(a).$$

Ejemplo 6.29. La función $f(x) = x^2$ es continua en 2 ya que $\lim_{x\to 2} x^2 = 4 = f(2)$.

Definición 6.14 (Función continua en un intervalo). Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$ y una función $f: A \to \mathbb{R}$, se dice que función f es continua en un intervalo $I \subseteq A$, si lo es en cada uno de los puntos de I.

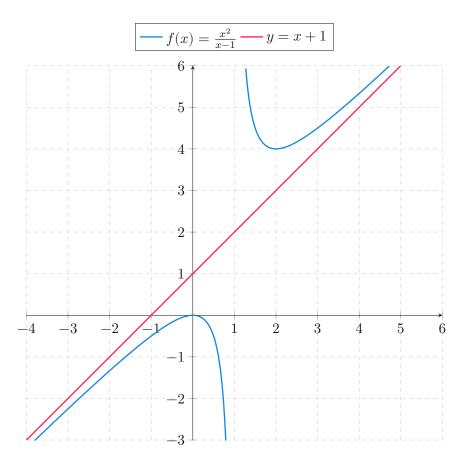


Figura 6.9: Asíntota oblicua.

De manera informal, se puede decir que una una función es continua en un intervalo, si puede dibujarse su gráfica en ese intervalo sin levantar el lápiz.

Ejemplo 6.30. La función constante f(x) = c es continua en todo \mathbb{R} , ya que $\lim_{x\to a} c = c = f(a) \ \forall a \in \mathbb{R}$.

La función identidad $\mathrm{Id}(x)=x$ es continua en todo $\mathbb{R},$ ya que $\lim_{x\to a}x=a=\mathrm{Id}(a)$ $\forall a\in\mathbb{R}.$

Del mismo modo, función $f(x)=x^2$ es continua en todo \mathbb{R} , ya que $\lim_{x\to a}x^2=a^2=f(a)$ $\forall a\in\mathbb{R}$,

Ejemplo 6.31. Veamos que la $f(x) \operatorname{sen}(x)$ es continua en todo \mathbb{R} . Sea $a \in \mathbb{R}$. Usando propiedades trigonométricas se tiene

$$|\operatorname{sen}(x) - \operatorname{sen}(a)| = |2\operatorname{sen}\left(\frac{x-a}{2}\right)\operatorname{cos}\left(\frac{x-a}{2}\right)| = 2|\operatorname{sen}\left(\frac{x-a}{2}\right)||\operatorname{cos}\left(\frac{x-a}{2}\right)| \leq 2\frac{|x-a|}{2} = |x-a|,$$

ya que $sen(x) \le x \ \forall x \in \mathbb{R} \ y \cos(x) \le 1 \ \forall x \in \mathbb{R}$.

Así pues, para cualquier $\varepsilon > 0$ existe $\delta = \varepsilon > 0$ tal que si $|x - a| < \delta = \varepsilon$, entonces $|\operatorname{sen}(x) - \operatorname{sen}(a)| < |x - a| = \varepsilon$.

De aquí se puede deducir que todas las funciones trigonométricas son continuas en su dominio.

De la definición de continuidad se deducen tres condiciones necesarias para la continuidad:

- 1. $f(a) \in Dom(f)$.
- 2. Existe $\lim_{x\to a} f(x)$.
- 3. $\lim_{x\to a} f(x) = f(a)$.

Si se rompe alguna de estas condiciones, se dice que la función presenta una discontinuidad en a.

6.11 Tipos de discontinuidades

Dependiendo de la condición de continuidad que se rompa, existen distintos tipos de discontinuidades:

- Discontinuidad evitable.
- Discontinuidad de 1^a especie de salto finito.
- Discontinuidad de 1^a especie de salto infinito.
- Discontinuidad de 2ª especie.

6.11.1 Discontinuidad evitable

Definición 6.15 (Discontinuidad evitable). Se dice que una función f tiene una discontinuidad evitable en el punto a si existe el límite de f en a pero $\lim_{x\to a} f(x) \neq f(a)$.

Ejemplo 6.32. La función $f(x)=\frac{x^2-1}{x-1}$ tiene una discontinuidad evitable en x=1 ya que la función no está definida en x=1 pero

$$\lim_{x\to 2} \frac{x^2-1}{x-1} = \lim_{x\to 2} x+1 = 2.$$

6.11.2 Discontinuidad de 1º especie de salto finito

Definición 6.16 (Discontinuidad de 1^a especie de salto finito). Se dice que una función f tiene una discontinuidad de 1^a especie de salto finito en el punto a si existen los límites laterales de f en a pero

$$\lim_{x\to a^-} f(x) \neq \lim_{x\to a^+} f(x).$$

A la diferencia entre ambos límite se le lama salto de la discontinuidad.

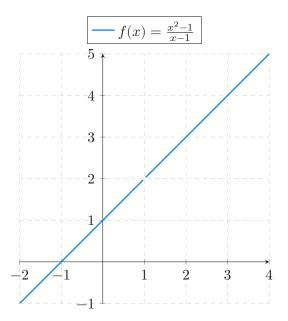


Figura 6.10: Discontinuidad evitable en x = 1

Ejemplo 6.33. La función $f(x) = \frac{|x|}{x}$ tiene una discontinuidad de 1ª especie de salto finito en x = 0 ya que

$$\lim_{x \to 0^{-}} \frac{|x|}{x} = -1$$

$$\lim_{x \to 0^{+}} \frac{|x|}{x} = 1$$

Salto = 1 - (-1) = 2.

6.11.3 Discontinuidad de 1ª especie de salto infinito

Definición 6.17 (Discontinuidad de 1^a especie de salto infinito). Se dice que una función f tiene una discontinuidad de 1^a especie de salto infinito en el punto a si

$$\lim_{x\to a^-}f(x)=\pm\infty\quad \text{o}\quad \lim_{x\to a^+}f(x)=\pm\infty.$$



Figura 6.11: Discontinuidad de primera especie de salto finito en x=0

Si f tienen una discontinuidad de 1^a especie de salto infinito en un punto a, entonces f tienen una asíntota vertical x=a.

Ejemplo 6.34. La función $f(x) = e^{1/x}$ tiene una discontinuidad de 1ª especie de salto infinito en x = 0 ya que

$$\lim_{x \to 0^{-}} e^{1/x} = 0$$

$$\lim_{x \to 0^{+}} e^{1/x} = \infty$$

6.11.4 Discontinuidad de 2^a especie

Definición 6.18 (Discontinuidad de 2^a especie). Se dice que una función f tiene una discontinuidad de 2^a especie en el punto a si no existe alguno de los límites laterales y tampoco se trata de una discontinuidad de 1^a especie de salto infinito.

Normalmente la discontinuidades de 2^a especie se dan en puntos donde la función no definida en sus proximidades.

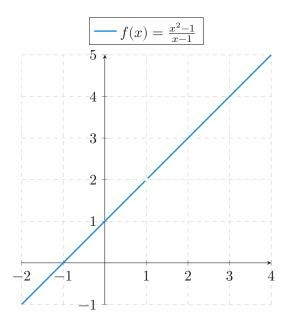


Figura 6.12: Discontinuidad de primera especie de salto infinito en x=0

Ejemplo 6.35. La función $f(x)=\frac{1}{\sqrt{x^2-1}}$ tiene una discontinuidad de 2ª especie en x=1 ya que

$$\lim_{x\to 1^-}\frac{1}{\sqrt{x^2-1}} \text{ no existe}$$

$$\lim_{x\to 1^+}\frac{1}{\sqrt{x^2-1}}=\infty$$

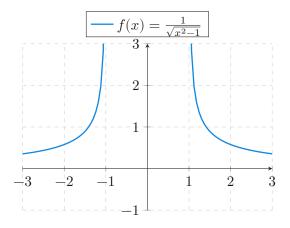


Figura 6.13: Discontinuidad de segunda especie en x=0

Proposición 6.14. Dado un conjunto $A \subseteq \mathbb{R}$, dos funciones $f, g : A \to \mathbb{R}$ y un punto de acumulación a de A, si f y g son continuas en a, entonces

- a. $f \pm g$ es continua en a.
- b. $f \cdot g$ es continua en a.
- c. cf es continua en a $\forall c \in \mathbb{R}$.
- d. $\frac{f}{g}$ es continua en a si $g(x) \neq 0 \ \forall x \in \mathbb{R}$.

i Demostración

Demostración. Es una consecuencia inmediata del álgebra de límites.

Ejemplo 6.36. El polinomio $p(x) = 2x^2 - x + 3$ es continuo en todo \mathbb{R} ya que las funciones $f(x) = x^2$, g(x) = x y h(x) = 3 son continuas en todo \mathbb{R} .

De hecho, se puede demostrar de manera similar que cualquier polinomio es continuo en todo $\mathbb{R}.$

Proposición 6.15. Dados dos conjuntos $A, B \subseteq \mathbb{R}$, dos funciones $f : A \to \mathbb{R}$, $g : B \to \mathbb{R}$ tales que $f(A) \subseteq B$ y un punto de acumulación a de A, si f es continua en a y g es continua en f(a), entonces $g \circ f$ es continua en a.

i Demostración

 $\begin{array}{l} \textit{Demostraci\'on}. \text{ Como } g \text{ es continua en } f(a), \text{ para cualquier } \varepsilon > 0 \text{ existe } \delta' > 0 \text{ tal } \\ \text{que si } |x - f(a)| < \delta' \text{ entonces } |g(x) - g(f(a))| < \varepsilon. \end{array}$

Por otro lado, como f es continua en a, para $\delta' > 0$ existe otro $\delta > 0$ tal que si $|x - a| < \delta$, entonces $|f(x) - f(a)| < \delta'$.

Así pues, si $|x-a|<\delta$ se tiene que $|f(x)-f(a)|<\delta'$ y $|g(f(x))-g(f(a))|<\varepsilon$, por lo que $\lim_{x\to a}g(f(x))=g(f(a))$ y $g\circ f$ es continua en a.

Ejemplo 6.37. Sea $f(x) = \frac{1}{x}$, que es continua en \mathbb{R} $\{0\}$ y $g(x) = \cos(x)$ que es continua en todo \mathbb{R} . Entonces $g \circ f(x) = \cos\left(\frac{1}{x}\right)$ es continua en \mathbb{R} $\{0\}$, mientras que $f \circ g(x) = \frac{1}{\cos(x)}$ es continua en \mathbb{R} $\{(2k+1)\pi/2 : k \in \mathbb{Z}\}$.

6.12 Funciones continuas en intervalos

Teorema 6.8. Dado un intervalo cerrado y acotado I = [a, b], y una función $f : I \to \mathbb{R}$, si f es continua en I, entonces f está acotada en I.

i Demostración

 $\begin{array}{l} \textit{Demostraci\'on}. \text{ Lo probaremos por reducci\'on al absurdo. Supongamos que } f \text{ no} \\ \text{est\'a acotada en } I. \text{ Entonces, para cada } n \in \mathbb{N} \text{ existe } x_n \in I \text{ tal que } |f(x_n)| > n. \\ \text{La sucesi\'on } (x_n)_{n=1}^{\infty} \text{ I\$ y como } I \text{ est\'a acotado, } (x_n)_{n=1}^{\infty} \text{ tambi\'en est\'a acotada, de manera que, por el Teorema } 4.6 \text{ existe una subsucesi\'on } (x_{n_k})_{k=1}^{\infty} \text{ que converge.} \\ \text{Sea } c = \lim_{k \to \infty} x_{n_k}. \text{ Como } (x_{n_k})_{k=1}^{\infty} \subset I, \text{ y } I \text{ es cerrado, por el Teorema } 3.4, \\ \text{contiene a todos sus puntos de acumulaci\'on, y por tanto } c \in I. \\ \text{Como } f \text{ es continua en } I, \text{ lo es, en particular, en } c, \text{ de modo que como } (x_{n_k})_{k=1}^{\infty} \\ \text{converge a } c, \lim_{k \to \infty} f(x_{n_k}) = f(c) \text{ y, por el Teorema } 4.2, (f(x_{n_k}))_{k=1}^{\infty} \text{ est\'a acotada, pero } |f(x_{n_k})| > n_k > k \ \forall k \in \mathbb{N}, \text{ lo que contradice que est\'e acotada. As\'i pues, } f \\ \text{est\'a acotada en } I. \\ \end{array}$

Ejemplo 6.38. La función

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{x} & \text{si } x \in (0, 1] \\ 0 & \text{si } x = 0 \end{cases}$$

no está acotada en el intervalo [0, 1], luego no es continua en este intervalo.

Teorema 6.9. Dado un intervalo cerrado y acotado I = [a,b], y una función $f: I \to \mathbb{R}$, si f es continua en I, entonces f alcanza el máximo y el mínimo en I, es decir, existen $c, d \in I$ tales que $c \le f(x) \le d \ \forall x \in I$.

i Demostración

Demostración. Como I = [a, b] es cerrado y acotado, y f es continua en I, por el teorema anterior se tiene que f está acotada en I.

Como $f(I) \neq \emptyset$ pues $f(a) \in f(I)$, por el axioma de completitud de los números reales, existe el supremo $s = \sup\{f(I)\}$. Para cada $n \in \mathbb{N}$, $s - \frac{1}{n}$ no es cota superior

de f(I), y por tanto, existe $x_n \in I$ tal que $s-\frac{1}{n} < f(x_n) < s$. Podemos construir así una sucesión $(x_n)_{n=1}^\infty \subset I$. Como I está acotado, por el por el Teorema 4.6 existe una subsucesión $(x_{n_k})_{k=1}^\infty$ que converge.

Sea $d = \lim_{k \to \infty} x_{n_k}$. Como $(x_{n_k})_{k=1}^{\infty} \subset I$, y I es cerrado, por el Teorema 3.4, contiene a todos sus puntos de acumulación, y por tanto $d \in I$.

Como f es continua en I, lo es, en particular, en d, de modo que como $(x_{n_k})_{k=1}^{\infty}$ converge a d, $\lim_{k\to\infty} f(x_{n_k}) = f(d)$. Además se tiene que $s-\frac{1}{k} < s-\frac{1}{n_k} < f(x_{n_k}) < s \ \forall k \in \mathbb{N}$. Así pues, por el teorema de compresión de funciones, se tiene que $\lim_{k\to\infty} f(x_{n_k}) = s$, y por tanto f(d) = s de modo que $f(d) \geq f(x) \ \forall x \in I$. Si ahora consideramos la función -f, que también es continua en I al ser la composición de funciones continuas, por lo que acabamos de demostrar, -f alcanza el máximo en I, es decir, existe $c \in I$ tal que $-f(c) \geq -f(x) \ \forall x \in I$, de donde se deduce que $f(c) \leq f(x) \ \forall x \in I$.

Teorema 6.10.

Bolzano

Dado un intervalo cerrado y acotado I = [a, b], y una función $f : I \to \mathbb{R}$, si f es continua en I, y f(a) < 0 < f(b), entonces existe $c \in (a, b)$ tal que f(c) = 0.

i Demostración

Demostración. Sea $A = \{x \in I : f(x) < 0\}$. $A \subset I$ y como I está acotado, también A está acotado. $A \neq \emptyset$ ya que $a \in A$, de manera que, por el axioma del supremo existe $c = \sup(A)$.

Veamos ahora que $c \in (a,b)$. Como f es continua en I, $\lim_{x \to a^-} f(x) = f(a) < 0$, de modo que existe $\delta_1 > 0$ tal que $f(x) < 0 \ \forall x \in [a,a+\delta_1)$, y por tanto, $[a,a+\delta_1) \subset A$, por lo que c > a.

Del mismo modo, $\lim_{x \to b^+} f(x) = f(b) > 0$, de modo que existe $\delta_2 > 0$ tal que $f(x) > 0 \ \forall x \in (b - \delta_2, b]$, y por tanto, $(b - \delta_2, b] \subset \overline{A}$, por lo que c < b.

Finalmente, veamos que f(c)=0 por reducción al absurdo. Si suponemos que f(c)>0, entonces $f(c)=\lim_{x\to c}f(x)>0$, de manera que existe $\delta>0$ tal que si f(x)>0 $\forall x\in(c-\delta,c+\delta)$, lo que contradice que c sea el supremo de A. Del mismo modo, si suponemos que f(c)<0, entonces $f(c)=\lim_{x\to c}f(x)<0$, de manera que existe $\delta>0$ tal que si f(x)<0 $\forall x\in(c-\delta,c+\delta)$, y entonces, $f\left(c+\frac{\delta}{2}\right)<0$, por lo que $c+\frac{\delta}{2}\in A$ y $c+\frac{\delta}{2}>c$, lo que contradice que c sea cota superior de a. Por consiguiente, debe ser a

Teorema 6.11 (Valores intermedios). Dado un intervalo cerrado y acotado I = [a, b], y una función $f: I \to \mathbb{R}$, si f es continua en I y si $c, d \in I$, entonces para cualquier k mathbbR con f(c) < k < f(d), existe $e \in I$ entre c y d tal que f(e) = k.

i Demostración

Demostración. Supongamos que c < d y tomemos la función $g : [c,d] \to \mathbb{R}$ tal que $g(x) = f(x) - k \ \forall x \in [c,d]$. Puesto que f es continua en [c,d], g también lo es. Además g(c) = f(c) - k < 0 y g(d) = f(d) - k > 0. Por tanto, por el teorema de Bolzano, existe $e \in (c,d)$ tal que g(e) = 0, y por consiguiente, g(e) = f(e) - k = 0, de donde se deduce que f(e) = k.

De forma análoga se procede si d < c.

Teorema 6.12. Dado un intervalo cerrado y acotado I = [a,b], y una función $f: I \to \mathbb{R}$, si f es continua en I y $k \in \mathbb{R}$ es tal que $\inf(f(I)) \le k \le \sup(f(I))$, entonces existe $e \in I$ tal que f(e) = k.

i Demostración

Demostración. Por el Teorema 6.9 existe $c, d \in I$ tales que $f(c) \leq f(x) \leq f(d)$ $\forall x \in I. \ f(c) = \min(f(I)) = \inf(f(I)) \leq k \leq \sup(f(I)) = \max(f(I)) = f(d)$. Si k = f(c) o k = f(d) el resultado es trivial, y si f(c) < k < f(d), por el teorema de los valores intermedios, existe $e \in I$ entre c y d tal que f(e) = k.

Teorema 6.13. Dado un intervalo cerrado y acotado I = [a, b], y una función $f : I \to \mathbb{R}$, si f es continua en I entonces f(I) es un intervalo cerrado y acotado.

i Demostración

Demostración. Por el Teorema 6.9 existe $c, d \in I$ tales que $f(c) \leq f(x) \leq f(d)$ $\forall x \in I$, por lo que $f(I) \subseteq [f(c), f(d)]$.

Veamos ahora que también se cumple el otro sentido de la inclusión. Si $k \in [f(c), f(d)]$, por el teorema anterior, se tiene que existe $e \in I$ tal que f(e) = k, y por tanto $k \in f(I)$, por lo que $[f(c), f(d)] \subset f(I)$.

Por consiguiente, f(I) = [f(c), f(d)] que es un intervalo cerrado y acotado.

Notas