Cálculo

Introducción a las matemáticas formales

Darvid

Axiomas de campo

Existe un conjunto llamado conjunto de los números reales, denotado por $\mathbb{R}$. A los elementos de este conjunto los llamaremos números reales. Este conjunto está dotado con dos operaciones binarias: $+$ (suma) y $\cdot$ (multiplicación).

Axiomas de la suma

La suma satisface las siguientes propiedades:

1. Cerradura (de la suma): Si $x, y \in \mathbb{R}$, entonces $x + y \in \mathbb{R}$.

2. Conmutatividad (de la suma): Si $x, y \in \mathbb{R}$, entonces $x + y = y + x$.

3. Asociatividad (de la suma): Si $x, y, z \in \mathbb{R}$, entonces $(x + y) + z = x + (y + z)$.

4. Neutro aditivo (o cero): $\exists 0 \in \mathbb{R}$ tal que si $x \in \mathbb{R}$, entonces $x + 0 = x$.

5. Inverso aditivo: Si $x \in \mathbb{R}$, entonces $\exists(-x) \in \mathbb{R}$ tal que $x + (-x) = 0$.

Necesidad de justificar

Proposición: Si a, b y c son números reales tales que $a + c = b + c$, entonces $a = b$. El siguiente es un esbozo de la prueba propuesta por un estudiante:

$$\begin{aligned} a + c &= b + c \\ a &= b + c - c \\ a &= b \end{aligned}$$

Aunque el resultado anterior no es incorrecto, debemos justificar cada igualdad a partir de las propiedades conocidas con el fin de preservar rigurosiad, al menos en la primera parte de este curso. Esto ayudará a que el lector se famirialice con el uso de las propiedades básicas de los números reales, antes de proceder a realizar pruebas más elaboradas.

Lista de Ejercicios 1

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

a) Si $a + b = a$, entonces $b = 0$. (Unicidad del neutro aditivo).

Demostración:

$$\begin{aligned} b &= b + 0 && \text{Neutro aditivo} \\ &= b + \big(a + (-a)\big) && \text{Inverso aditivo} \\ &= (b + a) + (-a) && \text{Asociatividad} \\ &= (a + b) + (-a) && \text{Conmutatividad} \\ &= a + (-a) && \text{Hipótesis} \\ &= 0 && \text{Neutro aditivo} \end{aligned}$$

□

b) Si $a + b = 0$, entonces $b = -a$. (Unicidad del inverso aditivo).

Demostración:

$$
\begin{aligned}
b &= b + 0 && \text{Neutro aditivo}\\
&= b + \big(a + (-a)\big) && \text{Inverso aditivo}\\
&= (b + a) + (-a) && \text{Asociatividad}\\
&= (a + b) + (-a) && \text{Conmutatividad}\\
&= 0 + (-a) && \text{Hipótesis}\\
&= (-a) + 0 && \text{Conmutatividad}\\
&= -a && \text{Neutro aditivo}
\end{aligned}
$$

□

Corolario: $-(-a) = a$. (Inverso aditivo del inverso aditivo).

Demostración:

$$
\begin{aligned}
0 &= a + (-a) && \text{Inverso aditivo}\\
&= (-a) + a && \text{Conmutatividad}
\end{aligned}
$$

Por la unicidad del inverso aditivo sigue que $a = -(-a)$. □

Nota: En esta demostración, al emplear la *forma* de la unicidad del inverso aditivo, $x+y = 0 \Longrightarrow y = -x$, hemos tomado $x = (-a)$ y $y = a$.

c) $-0 = 0$. (Cero es igual a su inverso aditivo).

Demostración:

$$
\begin{aligned}
0 &= 0 + (-0) && \text{Inverso aditivo}\\
&= (-0) + 0 && \text{Conmutatividad}\\
&= -0 && \text{Neutro aditivo}
\end{aligned}
$$

□

d) Si $a \neq 0$, entonces $-a \neq 0$.

Demostración: Si $-a = 0$, se verifica que

$$
\begin{aligned}
a &= a + 0 && \text{Neutro aditivo}\\
&= a + (-a) && \text{Hipótesis}\\
&= 0 && \text{Inverso aditivo}
\end{aligned}
$$

Por contraposición, si $a \neq 0$, entonces $-a \neq 0$. □

e) $-(a + b) = (-a) + (-b)$. (Distribución del signo).

Demostración:

$$
\begin{aligned}
0 &= 0 + 0 && \text{Neutro aditivo}\\
&= \big(a + (-a)\big) + \big(b + (-b)\big) && \text{Inverso aditivo}\\
&= a + \Big((-a) + \big(b + (-b)\big)\Big) && \text{Asociatividad}\\
&= a + \Big(\big((-a) + b\big) + (-b)\Big) && \text{Asociatividad}\\
&= a + \Big(\big(b + (-a)\big) + (-b)\Big) && \text{Conmutatividad}\\
&= a + \Big(b + \big((-a) + (-b)\big)\Big) && \text{Asociatividad}\\
&= (a + b) + \big((-a) + (-b)\big) && \text{Asociatividad}
\end{aligned}
$$

Por la unicidad del inverso aditivo, $(-a) + (-b) = -(a + b)$. □

Nota: En esta demostración, al emplear la *forma* de la unicidad del inverso aditivo, $x+y=0 \Longrightarrow y=-x$, hemos tomado $x=(a+b)$ y $y=(-a)+(-b)$.

Corolario: $-\big(a+(-b)\big)=b+(-a)$.

Demostración:

$$\begin{aligned}
-\big(a+(-b)\big) &= (-a)+\big(-(-b)\big) && \text{Distribución del signo}\\
&= (-a)+b && \text{Inverso aditivo del inverso aditivo}\\
&= b+(-a) && \text{Conmutatividad} \qquad \square
\end{aligned}$$

Nota: En esta demostración, al emplear la *forma* de la distribución del signo, $-(x+y)=(-x)+(-y)$, hemos tomado $x=a$ y $y=(-b)$.

f) Si $a+c=b+c$, entonces $a=b$. (Ley de cancelación de la suma).

Demostración:

$$\begin{aligned}
a &= a+0 && \text{Neutro aditivo}\\
&= a+\big(c+(-c)\big) && \text{Inverso aditivo}\\
&= (a+c)+(-c) && \text{Asociatividad}\\
&= (b+c)+(-c) && \text{Hipótesis}\\
&= b+\big(c+(-c)\big) && \text{Asociatividad}\\
&= b+0 && \text{Inverso aditivo}\\
&= b && \text{Neutro aditivo} \qquad \square
\end{aligned}$$

Observación: En el segundo paso de la demostración, podíamos sustituir 0 por $a+(-a)$ o por $b+(-b)$ (o por cualquier suma igual a 0). sin embargo, no en todos los casos resultaría útil. Observamos pues que para demostrar proposiciones matemáticas no basta con conocer las propiedades que satisfacen los *objetos* (en este caso números reales) con los que trabajamos; también requerimos intuir su uso apropiado. La experiencia indica que esta intuición se adquiere con la práctica. El lector debería verificar qué ocurre si sustituimos 0 por $a+(-a)$ o $b+(-b)$ en el segundo paso de esta prueba.

Nota: Si el contexto es claro, enunciaremos esta proposición como ley de cancelación.

Axiomas de la multiplicación

La multiplicación $\cdot$ satisface las siguientes propiedades:

6. Cerradura (de la multiplicación): Si $x, y \in \mathbb{R}$, entonces $x \cdot y \in \mathbb{R}$.

7. Conmutatividad (de la multiplicación): Si $x, y \in \mathbb{R}$, entonces $x \cdot y = y \cdot x$.

8. Asociatividad (de la multiplicación): Si $x, y, z \in \mathbb{R}$, entonces $(x \cdot y) \cdot z = x \cdot (y \cdot z)$.

9. Neutro multiplicativo (o uno): $\exists 1 \in \mathbb{R}$ y $1 \neq 0$ tal que si $x \in \mathbb{R}$, entonces $x \cdot 1 = x$.

10. Inverso multiplicativo: Si $x \in \mathbb{R}$ y $x \neq 0$, entonces $\exists x^{-1} \in \mathbb{R}$ tal que $x \cdot x^{-1} = 1$.

Lista de Ejercicios 2

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

a) Si $a \neq 0$ y $a \cdot b = a$, entonces $b = 1$. (Unicidad del neutro multiplicativo).

Demostración:

$$\begin{aligned}
b &= b \cdot 1 && \text{Neutro multiplicativo} \\
&= b \cdot (a \cdot a^{-1}) && \text{Inverso multiplicativo} \\
&= (b \cdot a) \cdot a^{-1} && \text{Asociatividad} \\
&= (a \cdot b) \cdot a^{-1} && \text{Conmutatividad} \\
&= a \cdot a^{-1} && \text{Hipótesis} \\
&= 1 && \text{Inverso multiplicativo} \qquad \square
\end{aligned}$$

Nota: La prueba requiere que $a \neq 0$, pues de otro modo (si $a = 0$), no podemos garantizar que $b = 1$. Veremos la prueba de este hecho más adelante.

b) Si $a \neq 0$ y $a \cdot b = 1$, entonces $b = a^{-1}$. (Unicidad del inverso multiplicativo).

Demostración:

$$\begin{aligned}
b &= b \cdot 1 && \text{Neutro multiplicativo} \\
&= b \cdot (a \cdot a^{-1}) && \text{Inverso multiplicativo} \\
&= (b \cdot a) \cdot a^{-1} && \text{Asociatividad} \\
&= a^{-1} \cdot (a \cdot b) && \text{Conmutatividad} \\
&= a^{-1} \cdot 1 && \text{Hipótesis} \\
&= a^{-1} && \text{Neutro multiplicativo} \qquad \square
\end{aligned}$$

Nota: La prueba requiere que $a \neq 0$, pues de otro modo no podemos garantizar la existencia de su inverso multiplicativo.

c) $1 = 1^{-1}$. (Uno es inverso multiplicativo).

Demostración:

$$\begin{aligned}
1 &= 1 \cdot 1^{-1} && \text{Inverso multiplicativo} \\
&= 1^{-1} \cdot 1 && \text{Conmutatividad} \\
&= 1^{-1} && \text{Neutro multiplicativo} \qquad \square
\end{aligned}$$

Nota: Por el axioma del neutro multiplicativo sabemos que $1 \neq 0$, por lo que existe su inverso multiplicativo.

d) Si $c \neq 0$ y $a \cdot c = b \cdot c$, entonces $a = b$. (Ley de cancelación de la multiplicación).

Demostración:

$$\begin{aligned}
a &= a \cdot 1 && \text{Neutro multiplicativo} \\
&= a \cdot \left(c \cdot c^{-1}\right) && \text{Inverso multiplicativo} \\
&= (a \cdot c) \cdot c^{-1} && \text{Asociatividad} \\
&= (b \cdot c) \cdot c^{-1} && \text{Hipótesis} \\
&= b \cdot \left(c \cdot c^{-1}\right) && \text{Asociatividad} \\
&= b \cdot 1 && \text{Inverso multiplicativo} \\
&= b && \text{Neutro multiplicativo} \qquad \square
\end{aligned}$$

Observación: La prueba requiere que $c \neq 0$, pues de otro modo no podemos garantizar la existencia de su inverso multiplicativo.

Nota: Si el contexto es claro, enunciaremos esta proposición como ley de cancelación.

Propiedad distributiva

Introducimos la propiedad que nos permite relacionar las operaciones de suma + y multiplicación ·

11. Distribución (de la multiplicación sobre la suma): Si $x, y, z \in \mathbb{R}$, entonces $x \cdot (y + z) = x \cdot y + x \cdot z$.

Ejemplo de argumento circular

Proposición: $b \cdot 0 = 0$. El siguiente es un esbozo de la prueba propuesta por un estudiante:

$$\begin{aligned} b \cdot 0 &= b \cdot \big(a + (-a)\big) && \text{Inverso aditivo} \\ &= b \cdot a + b \cdot (-a) && \text{Distribución} \\ &= a \cdot b + (-a) \cdot b && \text{Conmutatividad} \\ &= 0 && \text{¿?} \end{aligned}$$

Pero se requiere probar que $a \cdot b + (-a) \cdot b = 0$. Observemos ahora el siguiente esbozo para esta prueba:

$$\begin{aligned} a \cdot b + (-a) \cdot b &= b \cdot a + b \cdot (-a) && \text{Conmutatividad} \\ &= b \cdot \big(a + (-a)\big) && \text{Distribución} \\ &= b \cdot 0 && \text{Inverso aditivo} \\ &= 0 && \text{¿?} \end{aligned}$$

No obstante, se ha propuesto un **argumento circular**, por lo que no es posible verificar ninguna de las proposiciones anteriores. Requerimos pues, depender únicamente de axiomas o proposiciones previamente probadas para continuar.

Lista de Ejercicios 3 (LE3)

Sean a y b números reales, demuestre lo siguiente:

a) $a \cdot 0 = 0$. (Multiplicación por 0).

Demostración:

$$\begin{aligned} a \cdot 0 &= a \cdot 0 + 0 && \text{Neutro aditivo} \\ &= a \cdot 0 + \big(a + (-a)\big) && \text{Inverso aditivo} \\ &= a \cdot 0 + \big(a \cdot 1 + (-a)\big) && \text{Neutro multiplicativo} \\ &= (a \cdot 0 + a \cdot 1) + (-a) && \text{Asociatividad} \\ &= \big(a \cdot (0 + 1)\big) + (-a) && \text{Distribución} \\ &= a \cdot 1 + (-a) && \text{Neutro aditivo} \\ &= a + (-a) && \text{Neutro multiplicativo} \\ &= 0 && \text{Inverso aditivo} \end{aligned}$$ □

Corolario: Si $a \neq 0$, entonces $a^{-1} \neq 0$. (Cero no es inverso multiplicativo).

Demostración: Sea $a \neq 0$. Si $a^{-1} = 0$, se verifica que

$$\begin{aligned} 1 &= a \cdot a^{-1} && \text{Inverso multiplicativo} \\ &= a \cdot 0 && \text{Hipótesis} \\ &= 0 && \text{Multiplicación por 0} \end{aligned}$$

Pero esto contradice la propiedad del neutro multiplicativo. Por tanto, si $a \neq 0$, entonces $a^{-1} \neq 0$. □

Nota: El axioma del neutro multiplicativo no implica directamente que 0 no pueda ser inverso multiplicativo de algún número real, únicamente indica que si $x \in \mathbb{R}$ y $x \neq 0$, entonces $\exists x^{-1}$. El axioma tampoco especifica que para 0 el inverso multiplicativo no existe, sin embargo, si suponemos su existencia, es decir, si $\exists 0^{-1} \in \mathbb{R}$ tal que $0 \cdot 0^{-1} = 1$, tenemos por la multiplicación por 0 que $0 = 1$, lo que es una contradicción.

b) Si $a \cdot b = 0$, entonces $a = 0$ o $b = 0$ (disyunción).

Demostración: Demostraremos primero que si $a \neq 0$ y $b \neq 0$, entonces $a \cdot b \neq 0$.

Sea $a \neq 0$ y $b \neq 0$. Notemos que

$$\begin{aligned} a &= a \cdot 1 && \text{Neutro multiplicativo} \\ &= a \cdot \left(b \cdot b^{-1}\right) && \text{Inverso multiplicativo} \\ &= (a \cdot b) \cdot b^{-1} && \text{Asociatividad} \end{aligned}$$

Por hipótesis $a \neq 0$, por lo que $0 \neq (a \cdot b) \cdot b^{-1}$. Además, $b^{-1} \neq 0$, pues cero no es inverso multiplicativo.

Si $a \cdot b = 0$, por la multiplicación por cero, $(a \cdot b) \cdot b^{-1} = 0$, lo que es una contradicción. Por tanto, si $a \neq 0$ y $b \neq 0$, entonces $a \cdot b \neq 0$. Finalmente, por contraposición, si $a \cdot b = 0$, entonces $a = 0$ o $b = 0$. □

c) Si $a \neq 0$ y $b \neq 0$, entonces $(a \cdot b)^{-1} = a^{-1} \cdot b^{-1}$. (Multiplicación de inversos multiplicativos).

Demostración:

$$\begin{aligned} 1 &= b \cdot b^{-1} && \text{Inverso multiplicativo} \\ &= (b \cdot 1) \cdot b^{-1} && \text{Neutro multiplicativo} \\ &= \left(b \cdot (a \cdot a^{-1})\right) \cdot b^{-1} && \text{Inverso multiplicativo} \\ &= (b \cdot a) \cdot \left(a^{-1} \cdot b^{-1}\right) && \text{Asociatividad} \\ &= (a \cdot b) \cdot \left(a^{-1} \cdot b^{-1}\right) && \text{Conmutatividad} \end{aligned}$$

Por la unicidad del inverso multiplicativo $a^{-1} \cdot b^{-1} = (a \cdot b)^{-1}$. □

Nota: En esta demostración está implícito que $\exists (a \cdot b)^{-1} \in \mathbb{R}$, lo cual es válido pues hemos probado que si $a \neq 0$ y $b \neq 0$, entonces $a \cdot b \neq 0$, por lo que existe su inverso multiplicativo.

d) Si $a \neq 0$, entonces $\left(a^{-1}\right)^{-1} = a$.

Demostración:

$$\begin{aligned} 1 &= a \cdot a^{-1} && \text{Inverso multiplicativo} \\ &= a^{-1} \cdot a && \text{Conmutatividad} \end{aligned}$$

Por la unicidad del inverso multiplicativo sigue que $a = \left(a^{-1}\right)^{-1}$. □

Nota: En esta demostración está implícito que $\exists \left(a^{-1}\right)^{-1} \in \mathbb{R}$, lo cual es válido pues cero no es inverso multiplicativo, es decir, tenemos $a^{-1} \neq 0$, por lo que existe su inverso multiplicativo.

Al emplear la *forma* de la unicidad del inverso multiplicativo, $x \neq 0 \wedge x \cdot y = 1 \implies y = x^{-1}$, hemos tomado $x = a^{-1}$ y $y = a$.

e) $(-1) = (-1)^{-1}$. (Menos uno es inverso multiplicativo).

Demostración: Primero probaremos la existencia de $(-1)^{-1}$.

Si $-1 = 0$, tenemos que $1 + (-1) = 1 + 0$, y por neutro aditivo $1 + (-1) = 1$, pero el inverso aditivo satisface que $1 + (-1) = 1$, de donde sigue que $1 = 0$, lo que contradice la propiedad del neutro multiplicativo. Por tanto, $-1 \neq 0$, por lo que $\exists (-1)^{-1} \in \mathbb{R}$. Luego,

$$
\begin{aligned}
0 &= 1 + (-1) && \text{Inverso aditivo}\\
&= (-1)\cdot(-1)^{-1} + (-1) && \text{Inverso multiplicativo}\\
&= (-1)\cdot(-1)^{-1} + (-1)\cdot 1 && \text{Neutro multiplicativo}\\
&= (-1)\cdot\Big((-1)^{-1} + 1\Big) && \text{Distribución}
\end{aligned}
$$

Como $-1 \neq 0$, sigue que $(-1)^{-1}+1 = 0$, y por conmutatividad $1+(-1)^{-1} = 0$. Finalmente, por unicidad del inverso aditivo, $(-1)^{-1} = -1$. $\square$

Nota: En esta demostración, al emplear la *forma* de la unicidad del inverso aditivo, $x+y = 0 \Longrightarrow y = -x$, hemos tomado $x = 1$ y $y = (-1)^{-1}$.

f) $(-a)\cdot b = -(a\cdot b) = a\cdot(-b)$. (Multiplicación por inverso aditivo).

Demostración:

$$
\begin{aligned}
0 &= b\cdot 0 && \text{Multiplicación por 0}\\
&= b\cdot\big(a+(-a)\big) && \text{Inverso aditivo}\\
&= b\cdot a + b\cdot(-a) && \text{Distribución}\\
&= a\cdot b + (-a)\cdot b && \text{Conmutatividad}
\end{aligned}
\qquad
\begin{aligned}
0 &= a\cdot 0 && \text{Multiplicación por 0}\\
&= a\cdot\big(b+(-b)\big) && \text{Inverso aditivo}\\
&= a\cdot b + a\cdot(-b) && \text{Distribución}
\end{aligned}
$$

Por unicidad del inverso aditivo, se verifica que $(-a)\cdot b = -(a\cdot b) = a\cdot(-b)$. $\square$

Nota: En esta demostración, al emplear la *forma* de la unicidad del inverso aditivo, $x+y = 0 \Longrightarrow y = -x$, hemos tomado, $x = a\cdot b$ y $y = (-a)\cdot b$, por una parte y $y = a\cdot(-b)$, por la otra.

Corolario:

i) $(-a)\cdot(-b) = a\cdot b$.

Demostración:

$$
\begin{aligned}
(-a)\cdot(-b) &= a\cdot\big(-(-b)\big) && \text{Multiplicación por inverso aditivo}\\
&= a\cdot b && \text{Inverso aditivo del inverso aditivo}
\end{aligned}
$$
$\square$

Nota: Al emplear la *forma* de la multiplicación por inverso aditivo, $(-x)\cdot y = x\cdot(-y)$, hemos tomado $x = a$ y $y = (-b)$.

ii) $-(a^{-1}) = (-a)^{-1} = (-1)\cdot a^{-1}$. (Inverso aditivo del inverso multiplicativo).

Demostración:

$$
\begin{aligned}
(-1)\cdot a^{-1} &= -(1\cdot a^{-1}) && \text{Multiplicación por inverso aditivo}\\
&= -\big(a^{-1}\big) && \text{Neutro multiplicativo}
\end{aligned}
$$

Similarmente,

$$
\begin{aligned}
-(a^{-1}) &= \big(-(a^{-1})\big)\cdot 1 && \text{Neutro multiplicativo}\\
&= -\Big(\big(a^{-1}\big)\cdot 1\Big) && \text{Multiplicación por inverso aditivo}\\
&= -\Big(a^{-1}\Big) && \text{Neutro multiplicativo}
\end{aligned}
$$
$\square$

Nota: Al emplear la *forma* de la multiplicación por inverso aditivo, $(-x)\cdot y = -(x\cdot y)$, hemos tomado $x = 1$ y $y = a^{-1}$, por una parte, y $x = (a^{-1})$ y $y = 1$, por la otra.

Notación

- Si x y y son números reales, representaremos con el símbolo $x - y$ a la suma $x + (-y)$.
- Si $x, y \in \mathbb{R}$ y $y \neq 0$, representaremos con el símbolo $\frac{x}{y}$ al número $x\cdot y^{-1}$.
  Es inmediato que si $w \neq 0$, entonces $\frac{w}{w} = w\cdot w^{-1} = 1$.
- Si x y y son números reales, representaremos con el símbolo xy a la multiplicación $x\cdot y$.

Lista de ejercicios 4 (LE4)

Sean a, b, c y d números reales, demuestre lo siguiente:

a) $\frac{a}{b} = a \cdot \frac{1}{b}$, si $b \neq 0$.

Demostración:

$$\begin{aligned} \frac{a}{b} &= a \cdot b^{-1} && \text{Notación} \\ &= (a \cdot 1) \cdot b^{-1} && \text{Neutro multiplicativo} \\ &= a \cdot \left(1 \cdot b^{-1}\right) && \text{Asociatividad} \\ &= a \cdot \frac{1}{b} && \text{Notación} \end{aligned}$$

$\square$

b) $a \cdot \frac{c}{b} = \frac{ac}{b}$, si $b \neq 0$.

Demostración:

$$\begin{aligned} a \cdot \frac{c}{b} &= a \cdot \left(c \cdot b^{-1}\right) && \text{Notación} \\ &= (ac) \cdot b^{-1} && \text{Asociatividad} \\ &= \frac{ac}{b} && \text{Notación} \end{aligned}$$

$\square$

c) $\frac{a}{b} \cdot \frac{c}{d} = \frac{ac}{bd}$, si $b, d \neq 0$. (Multiplicación de fracciones).

Demostración:

$$\begin{aligned} \frac{a}{b} \cdot \frac{c}{d} &= \left(a \cdot b^{-1}\right) \cdot \left(c \cdot d^{-1}\right) && \text{Notación} \\ &= a \cdot \left(b^{-1} \cdot \left(c \cdot d^{-1}\right)\right) && \text{Asociatividad} \\ &= a \cdot \left(\left(b^{-1} \cdot c\right) \cdot d^{-1}\right) && \text{Asociatividad} \\ &= a \cdot \left(\left(c \cdot b^{-1}\right) \cdot d^{-1}\right) && \text{Conmutatividad} \\ &= a \cdot \left(c \cdot \left(b^{-1} \cdot d^{-1}\right)\right) && \text{Conmutatividad} \\ &= a \cdot \left(c \cdot (b \cdot d)^{-1}\right) && \text{Multiplicación de inversos multiplicativos} \\ &= (a \cdot c) \cdot (b \cdot d)^{-1} && \text{Asociatividad} \\ &= \frac{ac}{bd} && \text{Notación} \end{aligned}$$

$\square$

d) $\frac{a}{b} = \frac{ac}{bc}$, si $b, c \neq 0$. (Cancelación de factores en común).

Demostración:

$$\begin{aligned} \frac{a}{b} &= \frac{a}{b} \cdot 1 && \text{Neutro multiplicativo} \\ &= \frac{a}{b} \cdot \left(c \cdot c^{-1}\right) && \text{Inverso multiplicativo} \\ &= \frac{a}{b} \cdot \frac{c}{c} && \text{Notación} \\ &= \frac{ac}{b \cdot c} && \text{Multiplicación de fracciones} \end{aligned}$$

$\square$

e) $\frac{\frac{a}{b}}{\frac{c}{d}} = \frac{ad}{bc}$, si $b, c, d \neq 0$. (Regla del sandwich).

Demostración:

$$\begin{aligned}
\frac{\frac{a}{b}}{\frac{c}{d}} &= \frac{\left(a \cdot b^{-1}\right)}{\left(c \cdot d^{-1}\right)} && \text{Notación} \\
&= \left(a \cdot b^{-1}\right) \cdot \left(c \cdot d^{-1}\right)^{-1} && \text{Notación} \\
&= \left(a \cdot b^{-1}\right) \cdot \left(c^{-1} \cdot \left(d^{-1}\right)^{-1}\right) && \text{Multiplicación de inversos multiplicativos} \\
&= \left(a \cdot b^{-1}\right) \cdot \left(c^{-1} \cdot d\right) && \text{Unicidad del inverso multiplicativo} \\
&= \left(a \cdot b^{-1}\right) \cdot \left(d \cdot c^{-1}\right) && \text{Conmutatividad} \\
&= \frac{a}{b} \cdot \frac{d}{c} && \text{Notación} \\
&= \frac{ad}{bc} && \text{Multiplicación de fracciones} \qquad \square
\end{aligned}$$

Corolario: $\left(\frac{a}{b}\right)^{-1} = \frac{b}{a}$ si $a, b \neq 0$.

Demostración:

$$\begin{aligned}
\left(\frac{a}{b}\right)^{-1} &= \frac{1}{\frac{a}{b}} && \text{Notación} \\
&= \frac{1^{-1}}{\frac{a}{b}} && \text{Uno es inverso multiplicativo} \\
&= \frac{\frac{1}{1}}{\frac{a}{b}} && \text{Notación} \\
&= \frac{1 \cdot b}{1 \cdot a} && \text{Teorema} \\
&= \frac{b}{a} && \text{Neutro multiplicativo} \qquad \square
\end{aligned}$$

f) $\frac{a}{c} \pm \frac{b}{c} = \frac{a \pm b}{c}$, si $c \neq 0$. (Suma de fracciones con denominador conmún).

Demostración:

$$\begin{aligned}
\frac{a}{c} \pm \frac{b}{c} &= \left(a \cdot c^{-1}\right) \pm \left(b \cdot c^{-1}\right) && \text{Notación} \\
&= \left(c^{-1} \cdot a\right) \pm \left(c^{-1} \cdot b\right) && \text{Conmutatividad} \\
&= c^{-1} \cdot (a \pm b) && \text{Distribución} \\
&= (a \pm b) \cdot c^{-1} && \text{Conmutatividad} \\
&= \frac{a \pm b}{c} && \text{Notación} \qquad \square
\end{aligned}$$

g) $\frac{a}{b} \pm \frac{c}{d} = \frac{ad \pm bc}{bd}$, si $b, d \neq 0$. (Suma de fracciones).

Demostración:

$$\begin{aligned}
\frac{a}{b} \pm \frac{c}{d} &= \frac{ad}{bd} \pm \frac{cb}{db} && \text{Cancelación de factores en común} \\
&= \frac{ad}{bd} \pm \frac{cb}{bd} && \text{Conmutatividad} \\
&= \frac{ad \pm cb}{bd} && \text{Suma de fracciones con denominador común} \qquad \square
\end{aligned}$$

h) $\frac{a}{-b} = -\frac{a}{b} = \frac{-a}{b}$, si $b \neq 0$.

Demostración:

$$\begin{aligned} \frac{-a}{b} &= (-a)\cdot b^{-1} && \text{Notación} \\ &= -\left(ab^{-1}\right) && \text{Multiplicación por inverso aditivo} \\ &= -\frac{a}{b} && \text{Notación} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{a}{-b} &= a\cdot (-b)^{-1} && \text{Notación} \\ &= -\left(ab^{-1}\right) && \text{Multiplicación por inverso aditivo} \\ &= -\frac{a}{b} && \text{Notación} \end{aligned} \qquad \square$$

Nota: En esta prueba está implícito que $\exists (-b)^{-1} \in \mathbb{R}$, lo cual es válido, pues $b \neq 0$, por lo que $-b \neq 0$.

Una nota sobre notación

Las siguientes son todas las *formas* en que podríamos sumar/multiplicar tres números reales a, b y c.

i. $(a +/\cdot\ b) +/\cdot\ c$ **iv.** $(a +/\cdot\ c) +/\cdot\ b$ **vii.** $c +/\cdot\ (b +/\cdot\ a)$ **x.** $b +/\cdot\ (c +/\cdot\ a)$

ii. $a +/\cdot\ (b +/\cdot\ c)$ **v.** $(c +/\cdot\ a) +/\cdot\ b$ **viii.** $(c +/\cdot\ b) +/\cdot\ a$ **xi.** $b +/\cdot\ (a +/\cdot\ c)$

iii. $a +/\cdot\ (c +/\cdot\ b)$ **vi.** $c +/\cdot\ (a +/\cdot\ b)$ **ix.** $(b +/\cdot\ c) +/\cdot\ a$ **xii.** $(b +/\cdot\ a) +/\cdot\ c$

Podemos probar igualdad de todas ellas a partir de las propiedades de la suma/multiplicación:

$$\begin{aligned} (a +/\cdot\ b) +/\cdot\ c &= a +/\cdot\ (b +/\cdot\ c) && \text{Asociatividad} && \text{Formas (i) y (ii)} \\ &= a +/\cdot\ (c +/\cdot\ b) && \text{Conmutatividad} && \text{Forma (iii)} \\ &= (a +/\cdot\ c) +/\cdot\ b && \text{Asociatividad} && \text{Forma (iv)} \\ &= (c +/\cdot\ a) +/\cdot\ b && \text{Conmutatividad} && \text{Forma (v)} \\ &= c +/\cdot\ (a +/\cdot\ b) && \text{Asociatividad} && \text{Forma (vi)} \\ &= c +/\cdot\ (b +/\cdot\ a) && \text{Conmutatividad} && \text{Forma (vii)} \\ &= (c +/\cdot\ b) +/\cdot\ a && \text{Asociatividad} && \text{Forma (viii)} \\ &= (b +/\cdot\ c) +/\cdot\ a && \text{Conmutatividad} && \text{Forma (ix)} \\ &= b +/\cdot\ (c +/\cdot\ a) && \text{Asociatividad} && \text{Forma (x)} \\ &= b +/\cdot\ (a +/\cdot\ c) && \text{Conmutatividad} && \text{Forma (xi)} \\ &= (b +/\cdot\ a) +/\cdot\ c && \text{Asociatividad} && \text{Forma (xii)} \end{aligned}$$

A partir de esta igualdad (y otras probadas anteriormente) introducimos la siguiente **notación:**

- Si x, y y z son números reales, representaremos con el símbolo $x + y + z$ a la suma de estos.
- Si x, y y z son números reales, representaremos con el símbolo xyz a la multiplicación de estos.
- Si x y y son números reales, representaremos con el símbolo $-xy$ a cualquiera de $(-x)\cdot y$, $-(x \cdot y)$ o $x \cdot (-y)$.

  Podemos usar esta notación sin ambigüedad ya que hemos probado que $(-x)\cdot y = -(x\cdot y) = x\cdot(-y)$.
- Si $x \in \mathbb{R}$, representaremos con el símbolo $-x^{-1}$ al inverso multiplicativo de $-x$ o al inverso aditivo de x^{-1}.

  Podemos usar esta notación sin ambigüedad ya que hemos probado que $-(x^{-1}) = (-x)^{-1}$.
- Al número $1 + 1$ lo denotaremos con el símbolo 2. Al número $2 + 1$ lo denotaremos con el símbolo 3...

Nota: El uso de notación es opcional y en ocasiones prescindimos de ella.

Un campo finito

Si $a, b \in \mathbb{R}$ son tales que $a - b = b - a$, entonces $a = b$. El siguiente es un esbozo de la prueba:

$$\begin{aligned}
2a &= a + a && \text{Notación} \\
&= a + a + b - b && \text{Inverso aditivo} \\
&= a - b + a + b && \text{Conmutatividad} \\
&= b - a + a + b && \text{Hipótesis} \\
&= b + b && \text{Inverso aditivo} \\
&= 2b && \text{Notación}
\end{aligned}$$

A pesar de que se verifica la igualdad $2a = 2b$, aún necesitamos justificar que $a = b$. Podríamos apelar a la ley de cancelación de la multiplicación, pero para su uso requerimos que $2 \neq 0$, el cual es un hecho que hasta ahora no ha sido demostrado. No obstante, los axiomas que hemos listado y los resultados que hemos obtenido de ellos no son suficientes para probar este hecho, el lector debería indagar en las implicaciones de definir que $2 = 0$ y decidir si este hecho es contradictorio. Para clarificar este punto, consideremos el siguiente conjunto:

Sea Ω un conjunto dotado con las operaciones suma $+$ y multipllicación $\cdot$ que satisfacen las siguientes propiedades:

1. Cerradura (de la suma): Si $x, y \in \Omega$, entonces $x + y \in \Omega$.

2. Conmutatividad (de la suma): Si $x, y \in \Omega$, entonces $x + y = y + x$.

3. Asociatividad (de la suma): Si $x, y, z \in \Omega$, entonces $x + (y + z) = (x + y) + z$.

4. Neutro aditivo: $\exists 0 \in \Omega$ tal que si $x \in \Omega$, entonces $x + 0 = x$.

5. Inverso aditivo: para cada $x \in \Omega$, $\exists(-x) \in \Omega$ tal que $x + (-x) = 0$.

6. Cerradura (de la multiplicación): Si $x, y \in \Omega$, entonces $x \cdot y \in \Omega$.

7. Conmutatividad (de la multiplicación): Si $x, y \in \Omega$, entonces $x \cdot y = y \cdot x$.

8. Asociatividad (de la multiplicación): Si $x, y, z \in \Omega$, entonces $x \cdot (y \cdot z) = (x \cdot y) \cdot z$.

9. Neutro multiplicativo: $\exists 1 \in \Omega$ tal que si $x \in \Omega$, entonces $x \cdot 1 = x$.

10. Inverso multiplicativo: si $x \in \Omega$ tal que $x \neq 0$, entonces $\exists x^{-1}$ tal que $x \cdot x^{-1} = 1$.

11. Distribución (de la multiplicación sobre la suma): Si $x, y, z \in \mathbb{R}$, entonces $x \cdot (y + z) = x \cdot y + x \cdot z$.

¿Qué elementos pertenecen a Ω?

Sabemos que 0 y 1 son elementos de Ω, en virtud de los axiomas (4) y (9). Asimismo, el axioma (5) garantiza la existencia de -1 y -0. De la misma manera, por el axioma (10) podemos afirmar que 1^{-1} es un miembro de Ω. Sin embargo, los axiomas de conmutatividad (2) y (7), de asociatividad (3) y (8), y el axioma de distribución (11), no son axiomas de existencia y para su uso requerimos elementos de Ω, es decir, no podemos *conocer* elementos adicionales de Ω apartir de estos.

Con estas consideraciones, sabemos que $\left\{ 0, 1, -0, -1, 1^{-1} \right\} \subseteq \Omega$. Sin embargo, hemos probado que $0 = -0$ y $1 = 1^{-1}$, por lo que hasta ahora, solo podemos afirmar que $0, 1, -1$ son miembros de Ω.

Por otra parte, por el axioma de cerradura de la multiplicación (6), se verifica lo siguiente:

i) $0 \cdot 0 \in \Omega$, pero como $0 \cdot 0 = 0$, no encontramos un miembro distinto a los conocidos.

ii) $0 \cdot 1 \in \Omega$, pero como $0 \cdot 1 = 0$, no encontramos un miembro distinto a los conocidos.

iii) $0 \cdot (-1) \in \Omega$, pero como $0 \cdot (-1) = 0$, no encontramos un miembro distinto a los conocidos.

iv) $1 \cdot (-1) \in \Omega$, pero como $1 \cdot (-1) = -1$, no encontramos un miembro distinto a los conocidos.

v) $1 \cdot 1 \in \Omega$, pero como $1 \cdot 1 = 1$, no encontramos un miembro distinto a los conocidos.

Finalmente, por el axioma de cerradura (1) se verifica lo siguiente:

i) $0 + 0 \in \Omega$, pero como $0 + 0 = 0$, no encontramos un miembro distinto a los conocidos.

ii) $0 + 1 \in \Omega$, pero como $0 + 1 = 1$, no encontramos un miembro distinto a los conocidos.

iii) $0 + (-1) \in \Omega$, pero como $0 + (-1) = -1$, no encontramos un miembro distinto a los conocidos.

iv) $1 + (-1) \in \Omega$, pero como $1 + (-1) = 0$, no encontramos un miembro distinto a los conocidos.

v) $1 + 1 \in \Omega$, el cual es un elemento del que no podemos afirmar sea distinto a los conocidos.

Si definimos que bajo Ω, $2 = 0$, es decir, que $1 + 1 = 0$, entonces $1 + 1$ no sería un miembro distinto a los conocidos. Además, por unicidad del inverso aditivo, si $1+1 = 0$, sigue que $1 = -1$. De este modo, Ω cumpliría con todos los axiomas de campo consistentemente y su extensión sería $\Omega := \{ 0, 1 \}$.

Por lo anterior, para expandir el conjunto de los números reales, requerimos establecer propiedades adicionales.

Axiomas de orden

Existe un subconjunto del conjunto de los números reales llamado conjunto de los números reales positivos, denotado con el símbolo $\mathbb{R}^+$, el cual satisface las siguientes propiedades:

12. Si $x, y \in \mathbb{R}^+$, entonces $x + y \in \mathbb{R}^+$. (Cerradura de la suma en $\mathbb{R}^+$).

13. Si $x, y \in \mathbb{R}^+$, entonces $x \cdot y \in \mathbb{R}^+$. (Cerradura de la multiplicación en $\mathbb{R}^+$).

14. Para cada $x \in \mathbb{R}$, se verifica una y solo una de las siguientes condiciones (Tricotomía):

- **i)** $x \in \mathbb{R}^+$.
- **ii)** $x = 0$.
- **iii)** $-x \in \mathbb{R}^+$.

Lista de Ejercicios

a) Demuestre que $0 \notin \mathbb{R}^+$.

Demostración: Si $0 \in \mathbb{R}^+$ se contradice el axioma de tricotomía. □

b) Demuestre que $1 \in \mathbb{R}^+$. (Uno es positivo).

Demostración: Consideremos los casos:

- **i)** $1 = 0$, pero este caso se descarta por axioma del neutro multiplicativo.
- **ii)** Si $-1 \in \mathbb{R}^+$, por cerradura de la multiplicación en $\mathbb{R}^+$, $(-1) \cdot (-1) = 1 \in \mathbb{R}^+$, pero esto contradice la propiedad de tricotomía.

Por tanto, $1 \in \mathbb{R}^+$. □

Observación: para cualesquiera números reales a y b tenemos que $a = b$ o $a \neq b$. A su vez,

i) Si $a = b$, entonces $a - b = 0$.

ii) Si $a \neq b$, por tricotomía tenemos dos casos (excluyentes):

- $a - b \in \mathbb{R}^+$.
- $-(a - b) = b - a \in \mathbb{R}^+$.

A partir de esta observación introducimos la siguiente ***definición:***

Sean $x, y \in \mathbb{R}$,

- Si $x - y \in \mathbb{R}^+$, escribimos $y < x$ (o $x > y$).

De esta definición sigue que dados $x, y \in \mathbb{R}$, por tricotomía se verifica una y solo una de las siguientes condiciones

i) $y < x$.

ii) $x = y$.

iii) $x < y$.

Notación: Dados $x, y, z \in \mathbb{R}$, utilizaremos la notación

- $y \leq x$ (o $x \geq y$) para indicar que $y < x$ o $x = y$.
- $x < y < z$ para indicar que $x < y$ y $y < z$.

Números reales negativos

Definición: Llamaremos al conjunto $\mathbb{R}^- := \mathbb{R} \setminus \big(\mathbb{R}^+ \cup \{\, 0 \,\}\big)$ conjunto de los números reales negativos.

Lista de ejercicios 6 (LE6)

a) Demuestre que $\mathbb{R}^+$ y $\mathbb{R}^-$ son conjuntos disjuntos.

Demostración: Si $\mathbb{R}^+ \cap \Big(\mathbb{R} \setminus \big(\mathbb{R}^+ \cup \{\, 0 \,\}\big)\Big) \neq \varnothing$, entonces $\exists x \in \mathbb{R}$ tal que

(*) $x \in \mathbb{R}^+$, y

(**) $x \in \mathbb{R} \setminus \big(\mathbb{R}^+ \cup \{\, 0 \,\}\big)$.

De (**) sigue que $x \notin \mathbb{R}^+ \cup \{\, 0 \,\}$, es decir, $x \notin \{\, 0 \,\}$ y $x \notin \mathbb{R}^+$, pero esto contradice a (*).

Por tanto, $\mathbb{R}^+ \cap \Big(\mathbb{R} \setminus \big(\mathbb{R}^+ \cup \{\, 0 \,\}\big)\Big) = \varnothing$, es decir, $\mathbb{R}^+$ y $\mathbb{R}^-$ son conjuntos disjuntos. $\square$

b) Demuestre que $x \in \mathbb{R}^+$ si y solo si $-x \in \mathbb{R}^-$.

Demostración:

$\Rightarrow$) Sea $x \in \mathbb{R}^+$. Por tricotomía, $-x \notin \mathbb{R}^+$ y $x \neq 0$ (y por esto $-x \neq 0$). Sigue que $-x \in \mathbb{R} \setminus \big(\mathbb{R}^+ \cup \{\, 0 \,\}\big)$, y por defınción, $-x \in \mathbb{R}^-$.

$\Leftarrow$) Sea $-x \in \mathbb{R}^-$. Por definición, $-x \in \mathbb{R} \setminus \big(\mathbb{R}^+ \cup \{\, 0 \,\}\big)$, por lo que, $-x \notin \mathbb{R}^+ \cup \{\, 0 \,\}$, es decir, $-x \notin \mathbb{R}^+$ y $-x \notin \{\, 0 \,\}$ (y por tanto $-x \neq 0$). Entonces, por tricotomía, $-(-x) = x \in \mathbb{R}^+$. $\square$

c) Demuestre que si $x, y \in \mathbb{R}^-$, entonces $x + y \in \mathbb{R}^-$. (Cerradura de la suma en $\mathbb{R}^-$).

Demostración: Sea $x, y \in \mathbb{R}^-$. Sigue que $(-x), (-y) \in \mathbb{R}^+$, y por la cerradura de la suma en $\mathbb{R}^+$, $-x - y = -(x + y) \in \mathbb{R}^+$, por lo que $x + y \in \mathbb{R}^-$. $\square$

d) Demuestre que $x \in \mathbb{R}^+$ si y solo si $0 < x$. (Caracterización de $\mathbb{R}^+$).

Demostración:

$\Rightarrow$) Sea $x \in \mathbb{R}^+$, notemos que $x = x - 0 \in \mathbb{R}^+$, lo que denotamos como $0 < x$.

$\Leftarrow$) Sea $0 < x$, por definición $x - 0 = x \in \mathbb{R}^+$. $\square$

e) Demuestre que $x \in \mathbb{R}^-$ si y solo si $x < 0$. (Caracterización de $\mathbb{R}^-$).

Demostración:

$\Rightarrow$) Sea $x \in \mathbb{R}^-$. Notemos que $-x = 0 - x \in \mathbb{R}^+$, por lo que $x < 0$.

$\Leftarrow$) Sea $x < 0$. Por definición, $0 - x = -x \in \mathbb{R}^+$, por lo que $x \in \mathbb{R}^-$. $\square$

Lista de Ejercicios 5 (LE5)

Sean a, b, c y d números reales, demuestre lo siguiente:

a) Si $a < b$ y $b < c$, entonces $a < c$. (Transitividad).

Demostración: Por definición $(b-a), (c-b) \in \mathbb{R}^+$. Por cerradura de la suma en $\mathbb{R}^+$, $(b-a)+(c-b) \in \mathbb{R}^+$. De donde sigue que $(b - a) + (c - b) = b - a + c - b = c - a \in \mathbb{R}^+$, es decir, $a < c$. $\square$

b) $a < b$ si y solo si $a + c < b + c$. (Ley de cancelación de la suma en desigualdades).

Demostración:

$\Rightarrow$) Si $a < b$, por definición, $b - a \in \mathbb{R}^+$. Luego, $b - a = b - a + c - c = b + c - a - c = b + c - (a + c)$. De este modo, $b + c - (a + c) \in \mathbb{R}^+$, es decir, $a + c < b + c$.

$\Leftarrow$) Si $a + c < b + c$, por definición $b + a - (a + c) \in \mathbb{R}^+$. Luego, $b + c - (a + c) = b + c - a - c = b - a$. De este modo, $b - a \in \mathbb{R}^+$, es decir, $a < b$. $\square$

Nota: Si el contexto es claro, enunciaremos esta proposición como ley de cancelación.

Corolario:

i) $0 < a$ si y solo si $-a < 0$.

$$\begin{array}{lcl} \Rightarrow) & 0 < a & \text{Hipótesis} \\ & 0 + (-a) < a + (-a) & \text{Ley de cancelación} \\ & -a < 0 & \end{array} \qquad \begin{array}{lcl} \Leftarrow) & -a < 0 & \text{Hipótesis} \\ & -a + a < 0 + a & \text{Ley de cancelación} \\ & 0 < a & \end{array}$$

ii) $a < a + b$ si y solo si $0 < b$.

$$\begin{array}{lcl} \Rightarrow) & a < a + b & \text{Hipótesis} \\ & a - a < a + b - a & \text{Ley de cancelación} \\ & 0 < b & \end{array} \qquad \begin{array}{lcl} \Leftarrow) & 0 < b & \text{Hipótesis} \\ & 0 + a < a + b & \text{Ley de cancelación} \\ & a < a + b & \end{array}$$

iii) $a + b < a$ si y solo si $b < 0$.

$$\begin{array}{lcl} \Rightarrow) & a + b < a & \text{Hipótesis} \\ & a + b - a < a - a & \text{Ley de cancelación} \\ & b < 0 & \end{array} \qquad \begin{array}{lcl} \Leftarrow) & b < 0 & \text{Hipótesis} \\ & b + a < 0 + a & \text{Ley de cancelación} \\ & b + a < a & \end{array}$$

iv) $-a < b$ si y solo si $-b < a$.

$$\begin{array}{lcl} \Rightarrow) & -a < b & \text{Hipótesis} \\ & -a + a - b < b + a - b & \text{Ley de cancelación} \\ & -b < a & \end{array} \qquad \begin{array}{lcl} \Leftarrow) & -b < a & \text{Hipótesis} \\ & -b + b - a < a + b - a & \text{Ley de cancelación} \\ & -a < b & \end{array}$$

v) $a < -b$ si y solo si $b < -a$.

$$\begin{array}{lcl} \Rightarrow) & a < -b & \text{Hipótesis} \\ & a - a + b < -b - a + b & \text{Ley de cancelación} \\ & b < -a & \end{array} \qquad \begin{array}{lcl} \Leftarrow) & b < -a & \text{Hipótesis} \\ & b - b + a < -a + -b + a & \text{Ley de cancelación} \\ & a < -b & \end{array}$$

vi) $a < b$ si y solo si $-b < -a$.

$$\begin{array}{lcl} \Rightarrow) & a < b & \text{Hipótesis} \\ & a - a - b < b - b - a & \text{Ley de cancelación} \\ & -b < -a & \end{array} \qquad \begin{array}{lcl} \Leftarrow) & -b < -a & \text{Hipótesis} \\ & -b + b + a < -a + b - a & \text{Ley de cancelación} \\ & a < b & \end{array}$$

vii) Si $a < b < c$, entonces $-c < -b < -a$.
Notemos que $a < b \Rightarrow -b < -a$ y $b < c \Rightarrow -c < -b$. Es decir, $-c < -b < -a$.

c) Si $a < b$ y $c < d$, entonces $a + c < b + d$. (Suma *vertical* de desigualdades).

Demostración: Por definición $b - a \in \mathbb{R}^+$ y $d - c \in \mathbb{R}^+$. Por cerradura de la suma en $\mathbb{R}^+$ se verifica que $(b - a) + (d - c) \in \mathbb{R}^+$. Luego, $(b - a) + (d - c) = b + d - a - c = b + d - (a + c)$. Por lo que $b + d - (a + c) =\in \mathbb{R}^+$, es decir, $a + c < b + d$. $\square$

Observación: La suma *vertical* de desigualdades preserva el orden.

Corolario:

i) Si $0 < a$ y $0 < b$, entonces $0 < a + b$.
Por este teorema, $0 + 0 = 0 < a + b$.

ii) Si $a < 0$ y $b < 0$, entonces $a + b < 0$.
Por este teorema, $a + b < 0 = 0 + 0$.

d) Sea $a < b$. Encuentre las condiciones que deben cumplirse para que $a < b < a + b$, $a < a + b < b$, o $a + b < a < b$.

i) Si $0 < a$, por ley de cancelación, $0 + b < a + b$, por lo que $b < a + b$, y así $a < b < a + b$.

ii) Si $a < 0$ y $0 < b$, por ley de cancelación,

$$\begin{aligned} a &< 0 \\ a + b &< 0 + b \\ a + b &< b \end{aligned} \qquad\qquad \begin{aligned} 0 &< b \\ 0 + a &< b + a \\ a &< b + a \end{aligned}$$

Por tanto, $a < a + b < b$.

iii) Si $b < 0$. por ley de cancelación, $b + a < 0 + a$, es decir, $a + b < a$, por lo que $a + b < a < b$.

Conclusión: Si $a < b$ y

- $0 < a$, entonces $a < b < a + b$.
- $a < 0$, entonces $a < a + b < b$.
- $b < 0$, entonces $a + b < a < b$.

e) Sea $a < b$ y $c \in \mathbb{R}$. Encuentre las condiciones que deben cumplirse para que $ac < bc$ o $bc < ac$.

i) Sea $c \in \mathbb{R}^+$. Por definición $b - a \in \mathbb{R}^+$. Por cerradura de la multiplicación en $\mathbb{R}^+$ se verifica que $c(b - a) \in \mathbb{R}^+$. Sigue que $c(b - a) = cb - ca = bc - ac \in \mathbb{R}^+$, es decir, $ac < bc$.

ii) Sea $-c \in \mathbb{R}^+$. Como $b-a \in \mathbb{R}^+$, por cerradura de la multiplicación en $\mathbb{R}^+$, $-c(b-a) \in \mathbb{R}^+$. Sigue que $-c(b-a) = -c\Big(b+(-a)\Big) = (-c)\cdot b + (-c)\cdot(-a) = -cb + ca$. Finalmente, $-cb + ca = ac - bc \in \mathbb{R}^+$, es decir, $bc < ac$.

Conclusión:

- Si $a < b$ y $0 < c$, entonces $ac < bc$.
- Si $a < b$ y $c < 0$, entonces $bc < ac$.

f) Sea $a, b \in \mathbb{R}$. Encuentre las condiciones que deben cumplirse para que $ab < 0$ o $0 < ab$. (Ley de los signos).

Si a o b son cero, tenemos que $ab = 0$, por lo que descartamos esta posiblidad. Por tricotomía, $0 < a$ o $a < 0$ y $0 < b$ o $b < 0$, entonces observemos los casos:

i) Si $0 < a$ y $0 < b$, por la cerradura de la multiplicacón en $\mathbb{R}^+$, tenemos que $0 < ab$.

ii) Sin pérdida de generalidad, si $0 < a$ y $b < 0$, tenemos que $0 < -b$, y por la cerradura de la multiplicación en $\mathbb{R}^+$, $0 < -ab$, por lo que $ab < 0$.

iii) Si $a < 0$ y $b < 0$, entonces $0 < -a$ y $0 < -b$, por lo que $0 < (-a)(-b) = ab$.

Conclusión:

- Por (i) y (ii), para verificar $ab < 0$, un componente debe ser mayor a cero y el otro menor a cero.
- Por (iii), para verificar $0 < ab$, ambos componentes deben ser mayores o ambos menores a cero.

g) Si $a < b$ demuestre que $a < \frac{a+b}{2} < b$. (Punto medio).

Demostración:

$$\begin{aligned} a &< b \\ a + a &< a + b \\ 2a &< a + b \\ a &< \frac{a+b}{2} \end{aligned} \qquad\qquad \begin{aligned} a &< b \\ a + b &< b + b \\ a + b &< 2b \\ \frac{a+b}{2} &< b \end{aligned} \qquad \square$$

Definición: Al número $\frac{a+b}{2}$ lo llamaremos el punto medio entre a y b.

Observación: $b - \frac{a+b}{2} = \frac{a+b}{2} - a$ (la *distancia desde* a y *desde* b al punto medio es la misma).

$$b - \frac{a+b}{2} = \frac{2b}{2} - \frac{a+b}{2} = \frac{2b-a-b}{2} = \frac{b-a}{2} = \frac{b-2a+a}{2} = \frac{a+b-2a}{2} = \frac{a+b}{2} - \frac{2a}{2} = \frac{a+b}{2} - a$$

h) Sea $a \in \mathbb{R}$. Encuentre las condiciones que deben cumplirse para que $a^{-1} < a$ o $a < a^{-1}$.

Para que $\exists a^{-1}$, requerimos $a \neq 0$. También, sabemos que $a \neq 1$ y $a \neq -1$ pues $1 = 1^{-1}$ y $-1 = (-1)^{-1}$, pero buscamos desigualdad. Entonces, observemos los casos:

i) Si $a < -1$, entonces $1 < -a$, y por transitividad $0 < -a$, por lo que $0 < -a^{-1}$, luego,

$$\begin{aligned} 1 &< -a \\ 1 \cdot \left(-a^{-1}\right) &< (-a) \cdot \left(-a^{-1}\right) \\ -a^{-1} &< 1 \\ -1 &< a^{-1} \end{aligned}$$

Por transitividad, $a < a^{-1}$.

ii) Si $-1 < a < 0$, por notación $-1 < a$ y $a < 0$, de donde sigue que $-a < 1$ y $0 < -a$, por lo que $0 < -a^{-1}$.

$$\begin{aligned} -a &< 1 \\ (-a) \cdot (-a^{-1}) &< 1 \cdot (-a^{-1}) \\ 1 &< -a^{-1} \\ a^{-1} &< -1 \end{aligned}$$

Por transitividad, $a^{-1} < a$.

iii) Si $0 < a < 1$, por notación $0 < a$ y $a < 1$, de donde sigue que $0 < a^{-1}$. Luego

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

Por transitividad $a < a^{-1}$.

iv) Si $1 < a$, por transitividad $0 < a$, por lo que $0 < a^{-1}$. Luego,

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

Por transitividad $a^{-1} < a$.

Conclusión:

- Por (i) y (iii), $a < a^{-1}$, si $a < -1$ o $0 < a < 1$.
- Por (ii) y (iv), $a^{-1} < a$, si $-1 < a < 0$ o $1 < a$.

i) Sea $a \in \mathbb{R}$. Encuentre las condiciones que deben cumplirse para que $0 < a^{-1}$ o $a^{-1} < 0$.

i) Sea $0 < a$. Supongamos que $a^{-1} < 0$. Como $0 < a$, al multiplicar en desigualdades preserva el orden, por lo que $a^{-1} \cdot a < 0 \cdot a$. Por un lado, tenemos el inverso multiplicativo $a^{-1} \cdot a = 1$, y por el otro, tenemos una multiplicación por cero, $0 \cdot a = 0$, con lo que tenemos que $1 < 0$, pero esto es una contradicción. Sabemos que $a^{-1} \neq 0$, ya que 0 no es inverso multiplicativo. Por tricotomía, $a^{-1} > 0$.

ii) Sea $a < 0$. Sigue que $0 < -a$, por lo que $-a^{-1} > 0$, de donde sigue que $a^{-1} < 0$.

Conclusión:

- Si $0 < a$, entonces $0 < a^{-1}$.
- Si $a < 0$, entonces $a^{-1} < 0$.

j) Sea $a \in \mathbb{R}$. Encuentre las condiciones que deben cumplirse para que $1 < a^{-1}$, $0 < a^{-1} < 1$, $-1 < a^{-1} < 0$, o $a^{-1} < 1$.

i) Sea $0 < a < 1$. Notemos que $0 < a \Rightarrow 0 < a^{-1}$. Luego,

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

ii) Sea $1 < a$. Notemos que $1 < a \Rightarrow 0 < a \Rightarrow 0 < a^{-1}$. Luego,

$$\begin{aligned} 1 &< a \\ 1 \cdot a^{-1} &< a \cdot a^{-1} \\ 0 < a^{-1} &< 1 \end{aligned}$$

iii) Sea $-1 < a < 0$. Notemos que $a < 0 \Rightarrow 0 < -a$ y $-1 < a \Rightarrow -a < 1$, por lo que $0 < -a < 1$. Luego,

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

iv) Sea $a < -1$. Notemos que $a < -1 \Rightarrow 1 < -a$. Luego,

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

Conclusión:

- Si $0 < a < 1$, entonces $1 < a^{-1}$.
- Si $1 < a$, entonces $0 < a^{-1} < 1$.
- Si $-1 < a < 0$, entonces $a^{-1} < -1$.
- Si $a < -1$, entonces $-1 < a^{-1} < 0$.

k) Sea $a < b$. Encuentre las condiciones que deben cumplirse para que $\frac{1}{a} < \frac{1}{b}$ o $\frac{1}{b} < \frac{1}{a}$.
Sabemos que $a \neq 0$ y $b \neq 0$, pues requerimos la existencia de su inverso multiplicativo. Luego, por tricotomía, $0 < a$ o $a < 0$ y $0 < b$ o $b < 0$, entonces observemos los casos:

i) Si $0 < a$ y $0 < b$, por ley de los signos, $0 < ab$, por lo que $0 < \frac{1}{ab}$. Entonces, $a \cdot \frac{1}{ab} = \frac{1}{b} < \frac{1}{a} = b \cdot \frac{1}{ab}$.

ii) Si $a < 0$ y $0 < b$, entonces $\frac{1}{a} < 0$ y $0 < \frac{1}{b}$. Por transitividad, $\frac{1}{a} < \frac{1}{b}$.

iii) Si $a < 0$ y $b < 0$, por ley de los signos $0 < aa$, $0 < bb$ y $0 < ab$. Luego,

$$\begin{aligned} a &< b && \text{Supuesto inicial} \\ a \cdot (ab) &< b \cdot (ab) && (*) \end{aligned}$$

Por ley de los signos, $aa \cdot bb > 0$, de donde sigue que $\frac{1}{aa \cdot bb} > 0$. De (*) obtenemos que

$$\begin{aligned} \big(a \cdot (ab)\big) \cdot \frac{1}{aa \cdot bb} &< \big(b \cdot (ab)\big) \cdot \frac{1}{aa \cdot bb} \\ \frac{1}{b} &< \frac{1}{a} \end{aligned}$$

Conclusión: Si $a < b$ y

- $0 < a$ y $0 < b$, o $a < 0$ y $b < 0$, entonces, $\frac{1}{b} < \frac{1}{a}$.
- $a < 0$ y $0 < b$, entonces $\frac{1}{a} < \frac{1}{b}$.

l) Sea $a, b \in \mathbb{R}$. Encuentre las condiciones que deben cumplirse para que $1 < \frac{a}{b}$,$0 < \frac{a}{b} < 1$, $-1 < \frac{a}{b} < 0$, o $\frac{a}{b} < -1$.

i) Si $0 < b < a$, se tiene que $0 < \frac{1}{b}$. Luego,

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

ii) Si $0 < a < b$, se tiene que $0 < \frac{1}{b}$. Luego,

$$\begin{gathered} 0 < a < b \\ 0 \cdot \frac{1}{b} < a \cdot \frac{1}{b} < b \cdot \frac{1}{b} \\ 0 < \frac{a}{b} < 1 \end{gathered}$$

iii) Si $a < 0 < b$, se tiene que $0 < \frac{1}{b}$. Luego,

$$\begin{aligned} a &< 0 \\ a \cdot \frac{1}{b} &< 0 \cdot \frac{1}{b} \\ \frac{a}{b} &< 0 && (*) \\ 0 &< -\frac{a}{b} \end{aligned}$$

Del mismo modo,

$$-1$$

Por (*) y (**) se verifica que $-1 < \frac{a}{b} < 0$.

m) Sea $a, b \in \mathbb{R}$. Encuentre las condiciones que deben cumplirse para que $1 < ab$, $0 < ab < 1$, $-1 < ab < 0$, o $ab < -1$.

i) Sea $1 < a$ y $1 < b$. Por ley de cancelación, $0 < a - 1$ y $0 < b - 1$. Luego,

$$\begin{aligned} 0 &< (b-1)(a-1) \\ 0 &< \big(b + (-1)\big)\big(a + (-1)\big) \\ 0 &< a\big(b + (-1)\big) + (-1)\big(b + (-1)\big) \\ 0 &< ab + (-1)a + (-1)b + (-1)(-1) \\ 0 &< ab + (-1)a + (-1)b + 1 \\ 0 &< ab + (-1)(a + b) + 1 \\ 0 &< ab - (a + b) + 1 \\ a + b &< ab + 1 \end{aligned}$$

Por la suma vertical de desigualdades, $1 + 1 < a + b$, y por transitividad, $1 + 1 < ab + 1$, de donde $1 < ab$.

ii) Sea $0 < a < 1$ y $1 < b$. Notemos que $1 < a^{-1}$, por lo que

iii) Sea $0 < a < 1$ y $0 < b < 1$. Notemos que $ab > 0$. Como $a < 1$, sigue que $ab < b$, y a su vez, $b < 1$, por lo que $0 < ab < 1$.

iv) Sea $-1 < a < 0$ y $0 < b < 1$. Notemos que $ab < 0$. Como $b < 1$, sigue que $a < ab$, y a su vez $-1 < a$, por lo que $-1 < ab < 0$.

v) Si $-1 < a < 0$ y $-1 < b < 0$. Se tiene que $-1 < a < 0 \Rightarrow a^{-1} < -1 \Rightarrow 1 < -a^{-1}$ y $-1 < b < 0 \Rightarrow b^{-1} < -1 \Rightarrow 1 < -b^{-1} \Rightarrow 0 < -b^{-1}$.

$$\begin{aligned} 1 &< -a^{-1} \\ 1 \cdot (-b^{-1}) &< (-a^{-1}) \cdot (-b^{-1}) \\ -b^{-1} &< a^{-1}b^{-1} \\ 1 &< a^{-1}b^{-1} \qquad\qquad 1 < -b^{-1} \\ 1 &< (ab)^{-1} \end{aligned}$$

Por lo que $0 < \left((ab)^{-1}\right)^{-1} < 1$, es decir, $0 < ab < 1$.

Conclusión:

- Si $1 < a$ y $1 < b$, entonces $1 < ab$.
- Si $0 < a < 1$ y $0 < b < 1$, entonces $0 < ab < 1$.
- Si $-1 < a < 0$ y $0 < b < 1$, entonces $-1 < ab < 0$.
- Si $-1 < a < 0$ y $-1 < b < 0$, entonces $0 < ab < 1$.

n) Sea $a < b$ y $c < d$, encuentre las condiciones que deben cumplirse para que $ac < bd$ o $bd < ac$.

I) Sea $0 < a < b$.

i) Si $0 < c < d$, entonces $a < b \Rightarrow ac < bc$ y $c < d \Rightarrow bc < bd$. Por transitividad, $ac < bd$.

ii) Si $c < 0 < d$, entonces $c < d \Rightarrow ac < ad$ y $a < b \Rightarrow ad < bd$. Por transitividad, $ac < bd$.

iii) Si $c < d < 0$, entonces $a < b \Rightarrow bc < ac$ y $c < d \Rightarrow ac < ad$. Por transitividad, $bc < ad$.

II) Sea $a < 0 < b$.

i) Si $0 < c < d$, entonces $a < b \Rightarrow ac < bc$ y $c < d \Rightarrow bc < bd$. Por transitividad, $ac < bd$.

ii) Si $c < 0 < d$, entonces

o) Sea $\frac{a}{b} < \frac{c}{d}$. Encuentre las condiciones que deben cumplirse para que $\frac{a}{b} < \frac{a+c}{b+d} < \frac{c}{d}$. (Mediante).

Sabemos que $b \neq 0$ y $d \neq 0$. También, por definición, $\frac{c}{d} - \frac{a}{b} > 0$, es decir, $(bc - ad)/(bd) > 0$. Como b y d son distintos de cero, tenemos que $bd \neq 0$. Asimismo, $bc - ad \neq 0$.

Buscamos que $\frac{a}{b} < \frac{a+c}{b+d} < \frac{c}{d}$, para lo que es necesario que

$$\begin{aligned} \frac{a}{b} &< \frac{a+c}{b+d} \\ 0 &< \frac{a+c}{b+d} - \frac{a}{b} \\ &= \frac{b(a+c) - \big(a(b+d)\big)}{b(b+d)} \\ &= \frac{ab + bc - ab - ad}{b(b+d)} \\ &= \frac{bc - ad}{b(b+d)} \\ &= \frac{bc - ad}{bd} \cdot \frac{d}{b+d} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{a+c}{b+d} &< \frac{c}{d} \\ 0 &< \frac{c}{d} - \frac{a+c}{b+d} \\ &= \frac{c(b+d) - \big(d(a+c)\big)}{d(b+d)} \\ &= \frac{bc + cd - ad - cd}{d(b+d)} \\ &= \frac{bc - ad}{d(b+d)} \\ &= \frac{bc - ad}{bd} \cdot \frac{b}{b+d} \end{aligned}$$

Como $(bc - ad)/(bd) > 0$, entonces $\frac{d}{b+d} > 0$ y $\frac{b}{b+d} > 0$. Por esto, $b + d \neq 0$. Finalmente, tenemos dos casos:

i) Si $b > 0$, entonces $b + d > 0$ y $d > 0$.

ii) Si $b < 0$, entonces $b + d < 0$ y $d < 0$.

Por tanto, debe cumplirse que b y d deben ser ambos mayores a cero o ambos menores a cero.