

# Exámenes de Análisis Matemático



Alfredo Sánchez Alberca  
asalber@ceu.es  
<https://aprendeconalf.es>

# Tabla de contenidos

<b>Prefacio</b>	<b>3</b>
<b>1 2022-11-14 Examen de Análisis I</b>	<b>4</b>
<b>2 2022-12-14 Examen de Análisis I</b>	<b>9</b>
2.1 Primera parte . . . . .	9
2.2 Segunda parte . . . . .	13
<b>3 2023-03-11 Examen de Análisis II</b>	<b>19</b>
<b>4 2023-06-01 Examen de Análisis II</b>	<b>23</b>
4.1 Primera parte . . . . .	23
4.2 Segunda parte . . . . .	26
<b>5 2023-11-15 Examen de Análisis I</b>	<b>31</b>
<b>6 2023-11-14 Examen de Análisis III</b>	<b>36</b>
<b>7 2023-12-22 Examen de Análisis III</b>	<b>41</b>
<b>8 2024-01-11 Examen de Análisis I</b>	<b>47</b>

# **Prefacio**

Colección de exámenes de Análisis Matemático Real del grado en Ingeniería Matemática.

# 1 2022-11-14 Examen de Análisis I

**Ejercicio 1.1.** Calcular los puntos de acumulación del conjunto  $A = [0, 1] \cup \{\frac{n}{n-1} : n \in \mathbb{N}, n \geq 2\}$ . ¿Es un conjunto cerrado? ¿Y abierto?

## 💡 Solución

Veamos primero que todos los puntos del intervalo  $[0, 1]$  son puntos de acumulación. Sea  $x \in [0, 1]$ . Entonces para cualquier  $\varepsilon > 0$ , por la densidad de los números reales, el entorno reducido  $(x - \varepsilon, x + \varepsilon) \setminus \{x\}$  contiene puntos de  $[0, 1]$ , y por tanto  $x$  es un punto de acumulación de  $[0, 1]$ .

Veamos ahora que el conjunto  $B = \{\frac{n}{n-1} : n \in \mathbb{N}, n \geq 2\} = \{1 + \frac{1}{n-1} : n \in \mathbb{N}, n \geq 2\}$  solo tiene 1 como punto de acumulación. En primer lugar, 1 es punto de acumulación, ya que para cualquier  $\varepsilon > 0$ ,  $(1 - \varepsilon, 1 + \varepsilon) \setminus \{1\}$  contiene puntos de  $A$ . Para verlo, basta aplicar la propiedad arquimediana, por la que existe  $n \in \mathbb{N}$  tal que  $\frac{1}{n} < \varepsilon$ , de manera que  $1 + \frac{1}{n} < 1 + \varepsilon$ , y por tanto  $(1 - \varepsilon, 1 + \varepsilon) \setminus \{1\} \cap B \neq \emptyset$ .

Si  $x < 1$ , tomando  $\varepsilon = |x - 1|$  el entorno reducido  $(x - \varepsilon, x + \varepsilon) \setminus \{x\}$  no contiene puntos de  $B$ . Del mismo modo, si  $x > 2$ , tomando  $\varepsilon = |x - 2|$  el entorno reducido  $(x - \varepsilon, x + \varepsilon) \setminus \{x\}$  tampoco contiene puntos de  $B$ . Finalmente, si  $1 < x \leq 2$ , por la propiedad arquimediana, existe  $n \in \mathbb{N}$  tal que  $\frac{1}{n} \leq x < \frac{1}{n-1}$ . Tomando  $\varepsilon = \min(\{|x - \frac{1}{n}|, |x - \frac{1}{n-1}|\})$  también se tiene que el entorno reducido  $(x - \varepsilon, x + \varepsilon) \setminus \{x\}$  no contiene puntos de  $B$ . Por tanto, 1 es el único punto de acumulación de  $B$ .

Así pues,  $\text{Ac}(A) = [0, 1]$ , y como  $\text{Ac}(A) \subseteq A$ ,  $A$  es cerrado ya que contienen a todos sus puntos de acumulación (ver [teorema](#)), y por tanto, no puede ser abierto ya que los únicos conjuntos cerrados y abiertos a la vez son  $\mathbb{R}$  y  $\emptyset$ .

**Ejercicio 1.2.** Dada la sucesión  $(\frac{1}{2^n})_{n=1}^{\infty}$ ,

- Calcular, si existen, el supremo, ínfimo, máximo y mínimo del conjunto de sus términos.
- Demostrar que la sucesión converge a 0.

### Solución

- a. La sucesión es monótona decreciente, ya que  $\forall n \in \mathbb{N} 2^n < 2^{n+1}$ , y por tanto,  $x_n = \frac{1}{2^n} < \frac{1}{2^{n+1}} = x_{n+1}$ . Así pues, el primer término de la sucesión  $x_1 = 1/2$  es su máximo, y por tanto el supremo.

Veamos ahora que 0 es ínfimo por reducción al absurdo. En primer lugar, 0 es una cota inferior de la sucesión, pues todos sus términos son positivos. Supongamos ahora que existe otra cota inferior  $c \in \mathbb{R}$  tal que  $c > 0$ . Por la propiedad arquimediana, existe  $n \in \mathbb{N}$  tal que  $\frac{1}{n} < c$ . Ahora bien, como  $n < 2^n \forall n \in \mathbb{N}$ , se tiene que  $\frac{1}{2^n} < \frac{1}{n} < c$ , por lo que el término  $n$  de la sucesión es menor que  $c$ , lo que contradice que sea cota inferior. Así pues, 0 es el ínfimo. Sin embargo, la sucesión no tiene mínimo, pues  $x_n \neq 0 \forall n \in \mathbb{N}$ .

- b. Como la sucesión es monótona decreciente y está acotada inferiormente, por el [teorema de la convergencia de una sucesión monótona](#) la sucesión converge y  $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \inf(\{x_n : n \in \mathbb{N}\}) = 0$ .

**Ejercicio 1.3.** La rentabilidad de un bono cada año, en porcentaje, viene dada por la sucesión recurrente  $x_1 = 3$  y  $x_{n+1} = \sqrt{\frac{x_n}{2} + 3}$ . ¿Hacia dónde converge la rentabilidad del bono a medida que pasa el tiempo?

### Solución

Veamos que primero que la sucesión es monótona decreciente.  $x_1 = 3 > x_n = \sqrt{\frac{3}{2} + 3} = 2.12$ . Supongamos ahora que  $x_{n-1} > x_n$ . Entonces

$$\begin{aligned} x_{n-1} > x_n &\Rightarrow \frac{x_{n-1}}{2} > \frac{x_n}{2} \Rightarrow \frac{x_{n-1}}{2} + 3 > \frac{x_n}{2} + 3 \\ &\Rightarrow \sqrt{\frac{x_{n-1}}{2} + 3} > \sqrt{\frac{x_n}{2} + 3} \Rightarrow x_n > x_{n+1}. \end{aligned}$$

Por otro lado, es fácil ver que la sucesión está acotada inferiormente por 0 pues todos los términos son positivos. Así pues, por el [teorema de la convergencia de una sucesión monótona](#), la sucesión converge a un número  $x \in \mathbb{R}$ . Para calcular el límite, aprovechando la recurrencia de la sucesión se tiene

$$x = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{n+1} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{x_n}{2} + 3} = \sqrt{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n}{2} + 3} = \sqrt{\frac{x}{2} + 3}$$

Así pues, se cumple que  $x = \sqrt{\frac{x}{2} + 3}$ , y de ello se deduce

$$x = \sqrt{\frac{x}{2} + 3} \Rightarrow x^2 = \frac{x}{2} + 3 \Rightarrow x^2 - 3 = \frac{x}{2} \Rightarrow 2x^2 - x - 6 = 0,$$

y resolviendo la ecuación se tiene  $x = -3/2$  y  $x = 2$ . Como todos los términos de la sucesión son positivos, es imposible que converja a  $-3/2$ , y por tanto la rentabilidad del bono converge al 2%.

**Ejercicio 1.4.** Demostrar, usando la definición de límite, que  $\lim_{x \rightarrow 1} \frac{3x+1}{2} = 2$ .

#### 💡 Solución

Para cualquier  $\varepsilon > 0$  existe  $\delta = \frac{2}{3}\varepsilon$ , tal que si  $|x - 1| < \delta = \frac{2}{3}\varepsilon$  se tiene

$$\left| \frac{3x+1}{2} - 2 \right| = \left| \frac{3x+1-4}{2} \right| = \left| \frac{3x-3}{2} \right| = \left| \frac{3(x-1)}{2} \right| = \frac{3}{2}|x-1| < \frac{3}{2} \cdot \frac{2}{3}\varepsilon = \varepsilon.$$

**Ejercicio 1.5.** Sabiendo que  $\lim_{x \rightarrow 0} (1+x)^{1/x} = e$ , demostrar que las siguientes funciones son infinitésimos equivalentes en  $x = 0$ :

- a.  $\ln(1+x)$  y  $x$ .
- b.  $e^x - 1$  y  $x$ .

#### 💡 Solución

Para que dos funciones  $f$  y  $g$  sean infinitésimos equivalentes en  $x = 0$  se tiene que cumplir que  $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x)}{g(x)} = 1$ .

a.

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln(1+x)}{x} &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x} \ln(1+x) = \lim_{x \rightarrow 0} \ln((1+x)^{1/x}) \\ &= \ln\left(\lim_{x \rightarrow 0} (1+x)^{1/x}\right) = \ln(e) = 1. \end{aligned}$$

b. Haciendo uso del resultado anterior se tiene

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^x - 1}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^{\ln(x+1)} - 1}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x+1-1}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} 1 = 1.$$

**Ejercicio 1.6.** Determinar las asíntotas de la función  $f(x) = \ln\left(\frac{1}{x} + 1\right)x^2$ .

 Solución

El dominio de la función es  $\text{Dom}(f) = \mathbb{R} - [-1, 0]$  de modo que solo puede haber asíntotas verticales a la izquierda de  $-1$  o a la derecha de  $0$ . Veamos primero, qué pasa con el límite por la izquierda en  $-1$ .

$$\lim_{x \rightarrow -1^-} f(x) = \lim_{x \rightarrow -1^-} \ln\left(\frac{1}{x} + 1\right) x^2 = \ln\left(\frac{1}{-1} + 1\right) (-1)^2 = \ln(0) = -\infty.$$

Por tanto,  $f$  tiene una asíntota vertical por la izquierda en  $x = -1$ .

Veamos ahora, qué pasa con el límite por la derecha en  $0$ .

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) &= \lim_{x \rightarrow 0^+} \ln\left(\frac{1}{x} + 1\right) x^2 = \lim_{x \rightarrow 0^+} \ln\left(\frac{x+1}{x}\right) x^2 \\ &= \lim_{x \rightarrow 0^+} (\ln(x+1) - \ln(x)) x^2 \\ &= \lim_{x \rightarrow 0^+} \ln(x+1)x^2 - \lim_{x \rightarrow 0^+} \ln(x)x^2 \\ &= \ln(0+1)0^2 - \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\ln(x)}{1/x^2} \\ &= 0 - \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{(\ln(x))'}{(1/x^2)'} = -\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{1/x}{-2/x^3} = \quad (\text{L'Hôpital}) \\ &= -\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x^3}{-2x} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x^2}{2} = 0. \end{aligned}$$

Por lo tanto,  $f$  no tiene asíntota vertical en  $x = 0$ .

Para ver si hay asíntotas horizontales estudiamos los límites en el infinito.

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow \infty} f(x) &= \lim_{x \rightarrow \infty} \ln\left(\frac{1}{x} + 1\right) x^2 = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\ln(x^{-1} + 1)}{x^{-2}} \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{(\ln(x^{-1} + 1))'}{(x^{-2})'} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{x^{-1}+1}(-1)x^{-2}}{-2x^{-3}} = \quad (\text{L'Hôpital}) \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x}{2(x^{-1} + 1)} = \infty. \end{aligned}$$

Por tanto,  $f$  no tiene asíntota horizontal en  $\infty$ . Veamos ahora qué ocurre en  $-\infty$ .

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) &= \lim_{x \rightarrow -\infty} \ln\left(\frac{1}{x} + 1\right) x^2 = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{\ln(x^{-1} + 1)}{x^{-2}} \\ &= \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{(\ln(x^{-1} + 1))'}{(x^{-2})'} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{\frac{1}{x^{-1}+1}(-1)x^{-2}}{-2x^{-3}} = \quad (\text{L'Hôpital}) \\ &= \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{x}{2(x^{-1} + 1)} = -\infty. \end{aligned}$$

Luego,  $f$  tampoco tiene asíntota vertical en  $-\infty$ .

Finalmente, veamos si  $f$  tiene asíntotas oblicuas.

$$\begin{aligned}\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{x} &= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\ln\left(\frac{1}{x} + 1\right)x^2}{x} = \lim_{x \rightarrow \infty} \ln\left(\frac{1}{x} + 1\right)x \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \ln\left(\left(\frac{1}{x} + 1\right)^x\right) = \ln\left(\lim_{x \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{x} + 1\right)^x\right) \\ &= \ln(e) = 1\end{aligned}$$

Por tanto,  $f$  tiene asíntota vertical en  $\infty$  con pendiente  $b = 1$ . Para obtener el término independiente de la asíntota, calculamos el siguiente límite.

$$\begin{aligned}\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) - x &= \lim_{x \rightarrow \infty} \ln\left(\frac{1}{x} + 1\right)x^2 - x \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} (\ln(x^{-1} + 1)x - 1)x \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\ln(x^{-1} + 1)x - 1}{x^{-1}} \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{(\ln(x^{-1} + 1)x - 1)'}{(x^{-1})'} \quad (\text{L'Hôpital}) \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\frac{-1}{(x^{-1}+1)x^2}x + \ln(x^{-1} + 1)}{(-1)x^{-2}} \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\frac{-1}{(x+1)} + \ln(x^{-1} + 1)}{-x^{-2}} \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\left(\frac{-1}{(x+1)} + \ln(x^{-1} + 1)\right)'}{(-x^{-2})'} \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{(x+1)^2} - \frac{1}{(x^{-1}+1)x^2}}{2x^{-3}} \quad (\text{L'Hôpital}) \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{(x+1)^2} - \frac{1}{(x+1)x}}{2x^{-3}} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\frac{-1}{(x+1)^2}x}{2x^{-3}} \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{-x^3}{2(x^3 + 2x^2 + x)} = \frac{-1}{2}\end{aligned}$$

Así pues,  $f$  tiene una asíntota oblicua  $y = x - \frac{1}{2}$  en  $\infty$ .

Del mismo modo se prueba que esta misma recta también es asíntota oblicua de  $f$  en  $-\infty$ .

## 2 2022-12-14 Examen de Análisis I

### 2.1 Primera parte

**Ejercicio 2.1.** La población de parásitos que infecta un árbol, en miles, evoluciona diariamente siguiendo la sucesión recursiva  $x_1 = 2$  y  $x_{n+1} = 1 - (2 + x_n)^{-1} \forall n \in \mathbb{N}$ . Demostrar que la sucesión converge y calcular su límite.

#### Solución

El término recurrente de la sucesión puede escribirse de la siguiente manera

$$x_{n+1} = 1 - (2 + x_n)^{-1} = \frac{1 + x_n}{2 + x_n} \quad \forall n \in \mathbb{N}.$$

Veamos primero que la sucesión está acotada inferiormente por 0 por inducción.  $x_1 = 2 > 0$ , y suponiendo  $x_n > 0$  se tiene que  $x_{n+1} = \frac{1+x_n}{2+x_n} > 0 \quad \forall n \in \mathbb{N}$ .

Veamos ahora que la sucesión es decreciente también por inducción.  $x_1 = 2 < x_2 = 1 - (2 + 2)^{-1} = 3/4$ . Supongamos ahora que  $x_{n-1} > x_n$ , entonces

$$\begin{aligned} x_{n-1} > x_n &\Leftrightarrow 2 + x_{n-1} > 2 + x_n \Leftrightarrow (2 + x_{n-1})^{-1} < (2 + x_n)^{-1} \\ &\Leftrightarrow 1 - (2 + x_{n-1})^{-1} > 1 - (2 + x_n)^{-1} \Leftrightarrow x_n > x_{n+1} \quad \forall n \in \mathbb{N}. \end{aligned}$$

Así pues, como la sucesión es monótona decreciente y está acotada inferiormente, según el [teorema de la convergencia monótona](#), la sucesión converge.

Para calcular el límite aprovechamos la recurrencia,

$$x = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 + x_{n-1}}{2 + x_{n-1}} = \frac{1 + \lim_{n \rightarrow \infty} x_{n-1}}{2 + \lim_{n \rightarrow \infty} x_{n-1}} = \frac{1 + x}{2 + x},$$

y resolviendo la ecuación se tiene

$$x = \frac{1 + x}{2 + x} \Leftrightarrow x(2 + x) = 1 + x \Leftrightarrow x^2 + x - 1 = 0 \Leftrightarrow x = \frac{-1 \pm \sqrt{5}}{2}.$$

Como hemos visto que la sucesión está acotada inferiormente por 0, podemos descartar la solución negativa, de manera que,  $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \frac{-1 + \sqrt{5}}{2}$ .

**Ejercicio 2.2.** En el siglo III A.C usó el método por agotamiento para calcular el área encerrada por una circunferencia. La idea consiste en inscribir la circunferencia en polígonos regulares con un número de lados cada vez mayor.

El área de estos polígonos puede calcularse fácilmente descomponiendo los polígonos regulares en triángulos como en el siguiente ejemplo.

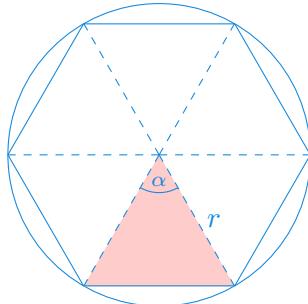


Figura 2.1: Descomposición de un hexágono en triángulos

- Dar el término general de la sucesión  $(a_n)_{n=3}^{\infty}$  que expresa el área del polígono en función del número de lados  $n$ .
- Calcular el límite de la sucesión.

#### 💡 Solución

- Consideremos cada uno de los triángulos en los que se puede descomponer un polígono regular de  $n$  lados.

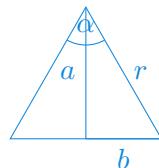


Figura 2.2: Dimensiones del triángulo

Puesto que para un polígono de  $n$  lados se obtienen  $n$  triángulos iguales, se tiene que el ángulo  $\alpha = \frac{2\pi}{n}$  de manera que  $\frac{\alpha}{2} = \frac{\pi}{n}$ .

Aplicando las razones trigonométricas de un triángulo rectángulo, se puede deducir que

$$\begin{aligned}\cos(\alpha/2) &= \cos(\pi/n) = \frac{a}{r} \Rightarrow a = r \cos(\pi/n) \\ \sin(\alpha/2) &= \sin(\pi/n) = \frac{b}{r} \Rightarrow b = r \sin(\pi/n)\end{aligned}$$

Por tanto, el área del triángulo es

$$\frac{a2b}{2} = ab = r^2 \cos(\pi/n) \sin(\pi/n),$$

y como hay  $n$  triángulos idénticos en el polígono regular de  $n$  lados, se tiene que el área del polígono es

$$a_n = nr^2 \cos(\pi/n) \sin(\pi/n)$$

b. Calculamos ahora el límite de la sucesión

$$\begin{aligned}\lim_{n \rightarrow \infty} a_n &= \lim_{n \rightarrow \infty} nr^2 \cos(\pi/n) \sin(\pi/n) \\ &= r^2 \lim_{n \rightarrow \infty} \cos(\pi/n) \lim_{n \rightarrow \infty} n \sin(\pi/n) \\ &= r^2 \cos(0) \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\pi}{\pi} \frac{n}{\pi} \sin(\pi/n) \\ &= \pi r^2 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sin(\pi/n)}{\pi/n} \\ &= \pi r^2 \lim_{\pi/n \rightarrow 0} \frac{\sin(\pi/n)}{\pi/n} = \pi r^2, \quad (\sin(\pi/n) \approx \pi/n)\end{aligned}$$

que efectivamente es el área del círculo de radio  $r$ .

**Ejercicio 2.3.** Sabiendo que  $\sin(x)$  y  $x$  son infinitésimos equivalentes en  $x = 0$ , demostrar que también lo son  $\operatorname{tg}(x)$  y  $x$ .

### Solución

Como  $\sin(x)$  y  $x$  son infinitésimos equivalentes en  $x = 0$ , se tiene que  $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin(x)}{x} = 1$ .

Para demostrar que  $\operatorname{tg}(x)$  y  $x$  también son infinitésimos equivalentes en  $x = 0$  calculamos el límite

$$\begin{aligned}\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\operatorname{tg}(x)}{x} &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{\sin(x)}{\cos(x)}}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{\cos(x)} \frac{\sin(x)}{x} \\ &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{\cos(x)} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{\cos(x)} 1 = \frac{1}{\cos(0)} = 1.\end{aligned}$$

Por tanto,  $\operatorname{tg}(x)$  y  $x$  son infinitésimos equivalentes en  $x = 0$ .

**Ejercicio 2.4.** Determinar el dominio y el tipo de asíntotas de la función

$$f(x) = \sqrt{\frac{x^3}{4x-1}}.$$

#### Solución

Para que exista la raíz, el radicando debe ser positivo, es decir,  $\frac{x^3}{4x-1} \geq 0$ . Es fácil ver que  $x^3 \geq 0 \Leftrightarrow x \geq 0$  y  $4x - 1 \geq 0 \Leftrightarrow x \geq 1/4$  de manera que  $\frac{x^3}{4x-1} \geq 0 \Leftrightarrow x \leq 0$  o  $x \geq 1/4$ .

Por otro lado, para que exista  $\frac{x^3}{4x-1}$  el denominador no puede anularse, es decir  $4x - 1 \neq 0 \Leftrightarrow x \neq 1/4$ . Por tanto, concluimos que el dominio de la función es  $\text{Dom}(f) = (-\infty, 0] \cup (\frac{1}{4}, \infty)$ .

Estudiamos ahora los tipos de asíntotas que tiene la función.

#### Asíntotas verticales

Los únicos puntos donde pueden existir asíntotas verticales son  $x = 0$  y  $x = 1/4$ , así que calculamos los límites laterales en estos puntos.

$$\lim_{x \rightarrow 0^-} f(x) = \lim_{x \rightarrow 0^-} \sqrt{\frac{x^3}{4x-1}} = \sqrt{\frac{0^3}{4 \cdot 0 - 1}} = 0,$$

y por tanto,  $f$  no tiene asíntota vertical en  $x = 0$ .

$$\lim_{x \rightarrow 1/4^+} f(x) = \lim_{x \rightarrow 1/4^+} \sqrt{\frac{x^3}{4x-1}} = \sqrt{\frac{(1/4)^3}{4(1/4) - 1}} = \infty,$$

y por tanto,  $f$  tiene una asíntota vertical en  $x = 1/4$ .

#### Asíntotas horizontales

Para ver si hay asíntotas horizontales estudiamos los límites en  $\pm\infty$ .

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow -\infty} \sqrt{\frac{x^3}{4x-1}} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \sqrt{\frac{\frac{x^3}{x}}{\frac{4x-1}{x}}} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \sqrt{\frac{x^2}{4 - \frac{1}{x}}} = \infty.$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{x^3}{4x-1}} = \lim_{x \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\frac{x^3}{x}}{\frac{4x-1}{x}}} = \lim_{x \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{x^2}{4 - \frac{1}{x}}} = \infty.$$

Por tanto,  $f$  no tiene asíntotas horizontales.

#### Asíntotas oblicuas

Para ver si hay asíntotas oblicuas estudiamos los límites de  $f(x)/x$  en  $\pm\infty$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \sqrt{\frac{x^3}{4x-1}} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \sqrt{\frac{x^3}{4x^3-x^2}} = \sqrt{\frac{1}{4}} = -\frac{1}{2}$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{x^3}{4x-1}} = \lim_{x \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{x^3}{4x^3-x^2}} = \sqrt{\frac{1}{4}} = \frac{1}{2}$$

Por tanto,  $f$  tiene asíntotas oblicuas tanto en  $-\infty$  como en  $\infty$ .

**Ejercicio 2.5.** Dado el conjunto  $A = \{x \in \mathbb{R} : \frac{x^2-1}{x-2} \leq 0\}$ , calcular, si existe, el supremo, ínfimo, máximo y mínimo. ¿Es un conjunto cerrado o abierto?

#### 💡 Solución

$A$  puede expresarse con la unión de intervalos, ya que  $x^2 - 1 \geq 0 \Leftrightarrow x^2 \geq 1 \Leftrightarrow x \leq -1$  o  $x \geq 1$ , y por otro lado,  $x-2 \geq 0 \Leftrightarrow x \geq 2$ , de manera que  $\frac{x^2-1}{x-2} \leq 0 \Leftrightarrow x \leq -1$  o  $1 \leq x < 2$ , es decir,  $A = (-\infty, -1] \cup [1, 2)$ .

Es fácil ver que  $A$  está acotado superiormente y la menor de las cotas superiores es 2, por lo que el supremo es 2, pero como  $2 \notin A$ ,  $A$  no tiene máximo.

En cuanto al ínfimo,  $A$  no está acotado inferiormente, de manera que no tiene ínfimo, y por tanto, tampoco mínimo.

$A$  no es abierto, ya que  $-1 \in A$ , pero  $-1$  no es un punto interior de  $A$ , ya que para cualquier  $\varepsilon > 0$  el intervalo  $(-1 - \varepsilon, -1 + \varepsilon)$  contiene puntos de  $\overline{A}$ .

Por otro lado,  $A$  tampoco es cerrado ya que  $\overline{A} = (-1, 1) \cup [2, \infty)$  no es abierto, pues  $2 \in \overline{A}$  pero no es un punto interior suyo, ya que para cualquier  $\varepsilon > 0$  el intervalo  $(2 - \varepsilon, 2 + \varepsilon)$  contiene puntos de  $A$ .

## 2.2 Segunda parte

**Ejercicio 2.6.** Dar una aproximación de  $\ln(\sqrt{1/2})$  usando un polinomio de Taylor de cuarto grado.

#### 💡 Solución

Para realizar la aproximación que se pide calcularemos el polinomio de Taylor de cuarto grado de la función  $f(x) = \ln(\sqrt{x})$  en el punto 1, ya que el valor de la función y sus sucesivas derivadas en este punto son sencillas. La fórmula del polinomio de Taylor es

$$P_{f,1}^4(x) = f(1) + f'(1)(x-1) + \frac{f''(1)}{2!}(x-1)^2 + \frac{f'''(1)}{3!}(x-1)^3 + \frac{f''''(1)}{4!}(x-1)^4.$$

Así pues, calculamos hasta la cuarta derivada en 1:

$$\begin{aligned} f(x) &= \ln(\sqrt{x}) = \frac{1}{2}\ln(x) & f(1) &= \frac{1}{2}\ln(1) = 0 \\ f'(x) &= \frac{1}{2}x^{-1} & f'(1) &= \frac{1}{2} \\ f''(x) &= \frac{-1}{2}x^2 & f''(1) &= \frac{-1}{2} \\ f'''(x) &= x^{-3} & f'''(1) &= 1 \\ f''''(x) &= -3x^{-4} & f''''(1) &= -3 \end{aligned}$$

Y sustituyendo en la fórmula del polinomio de Taylor se tiene

$$\begin{aligned} P_{f,1}^4(x) &= 0 + \frac{1}{2}(x-1) + \frac{-1/2}{2}(x-1)^2 + \frac{1}{6}(x-1)^3 + \frac{-3}{24}(x-1)^4 \\ &= \frac{1}{2}(x-1) - \frac{1}{4}(x-1)^2 + \frac{1}{6}(x-1)^3 - \frac{1}{8}(x-1)^4. \end{aligned}$$

Para aproximar  $\ln(\sqrt{1/2})$  calculamos el polinomio en  $x = 1/2$ .

$$P_{f,1}^4(1/2) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} - 1 \right) - \frac{1}{4} \left( \frac{1}{2} - 1 \right)^2 + \frac{1}{6} \left( \frac{1}{2} - 1 \right)^3 - \frac{1}{8} \left( \frac{1}{2} - 1 \right)^4 = -0.34114583.$$

**Ejercicio 2.7.** La función  $h(x) = \frac{x^2 - 2x + a}{x^3 + bx^2 - 6x}$  tiene una discontinuidad evitable en  $x = 2$ . Calcular el valor de  $a$  y  $b$ , y clasificar el resto de discontinuidades.

### Solución

Para que la función  $h(x) = \frac{x^2 - 2x + a}{x^3 + bx^2 - 6x}$  tenga una discontinuidad evitable en  $x = 2$ , debe cumplirse que  $\lim_{x \rightarrow 2} h(x) \neq h(2)$ . Una manera de que esto se cumpla es que la función no esté definida en  $x = 2$  pero sí exista el límite en ese punto. Para que la función no esté definida en  $x = 2$  el denominador debe anularse, es decir,

$$2^3 + b2^2 - 6 \cdot 2 = 0 \Rightarrow 8 + 4b - 12 = 0 \Rightarrow b = 1.$$

Por otro lado, el límite en  $x = 2$  es

$$\lim_{x \rightarrow 2} \frac{x^2 - 2x + a}{x^3 + x^2 - 6x} = \frac{a}{0},$$

de manera que, para que el límite exista, debe ser  $a = 0$ , y en tal caso,

$$\lim_{x \rightarrow 2} \frac{x^2 - 2x}{x^3 + x^2 - 6x} = \lim_{x \rightarrow 2} \frac{x(x-2)}{x(x-2)(x+3)} = \lim_{x \rightarrow 2} \frac{1}{x+3} = \frac{1}{5},$$

y, por tanto,  $h(x)$  tiene una discontinuidad evitable en  $x = 2$  como se pide.

Como se trata de una función racional, será discontinua en los puntos que anulen el denominador, es decir  $x = -3$ ,  $x = 0$  y  $x = 2$ . Ya hemos visto que en  $x = 2$  hay una discontinuidad evitable y faltaría clasificar las otras dos discontinuidades.

En  $x = -3$  se tiene

$$\begin{aligned}\lim_{x \rightarrow -3^-} \frac{x(x-2)}{x(x-2)(x+3)} &= \lim_{x \rightarrow -3^-} \frac{1}{x+3} = -\infty, \\ \lim_{x \rightarrow -3^+} \frac{x(x-2)}{x(x-2)(x+3)} &= \lim_{x \rightarrow -3^+} \frac{1}{x+3} = \infty,\end{aligned}$$

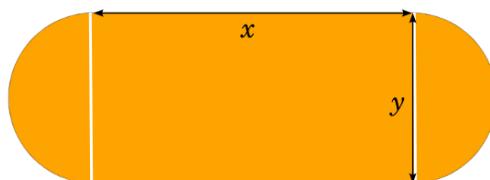
y, por tanto,  $h$  tiene una discontinuidad de salto infinito en  $x = -3$ .

Finalmente en  $x = 0$  se tiene

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{x(x-2)}{x(x-2)(x+3)} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x+3} = \frac{1}{3},$$

por lo que  $h$  tiene otra discontinuidad evitable en  $x = 0$ .

**Ejercicio 2.8.** El envoltorio de unas píldoras está formado por un cilindro con dos semiesferas en sus extremos, tal y como se aprecia en la imagen.



Si el contenido de las píldoras debe ser de 0.15 ml, hallar las dimensiones de  $x$  e  $y$  para que el material empleado en el envoltorio sea mínimo.

### Solución

El volumen de una esfera de radio  $r$  es  $v_e(r) = \frac{4}{3}\pi r^3$  y el de un cilindro de radio  $r$  y altura  $h$  es  $v_c(r, h) = \pi r^2 h$ , de modo que el volumen de la píldora es  $v(r, h) = v_e(r) + v_c(r, h) = \frac{4}{3}\pi r^3 + \pi r^2 h$ . Como el volumen de la píldora debe ser

$0.15 \text{ ml} = 0.15 \text{ cm}^3$ , imponiendo esta restricción, se tiene

$$v(r, h) = \frac{4}{3}\pi r^3 + \pi r^2 h = 0.15 \Leftrightarrow h = \frac{0.15 - \frac{4}{3}\pi r^3}{\pi r^2}. \quad (2.1)$$

Por otro lado, la superficie de una esfera de radio  $r$  es  $s_e(r) = 4\pi r^2$  y la superficie del envolvente de un cilindro de radio  $r$  y altura  $h$  es, en realidad, la superficie de un rectángulo de lados  $2\pi r$  y  $h$ , es decir,  $s_c(r, h) = 2\pi rh$ , de manera que la superficie de la píldora es  $s(r, h) = 4\pi r^2 + 2\pi rh$ , pero sustituyendo el valor de  $h$  que hemos obtenido de imponer la restricción del volumen se tiene,

$$\begin{aligned} s(r) &= 4\pi r^2 + 2\pi r \left( \frac{0.15 - \frac{4}{3}\pi r^3}{\pi r^2} \right) = 4\pi r^2 + \left( \frac{0.3 - \frac{8}{3}\pi r^3}{r} \right) \\ &= 4\pi r^2 + \frac{0.3}{r} - \frac{8}{3}\pi r^2 = \frac{4}{3}\pi r^2 + \frac{0.3}{r}, \end{aligned}$$

que es la función a optimizar.

Para calcular el mínimo de la función, calculamos primero los puntos críticos.

$$s'(r) = \frac{4}{3}\pi 2r - \frac{0.3}{r^2} = 0 \Leftrightarrow \frac{8}{3}\pi r = \frac{0.3}{r^2} \Leftrightarrow r^3 = \frac{0.9}{8\pi} \Leftrightarrow r = \sqrt[3]{\frac{0.9}{8\pi}} \approx 0.3296 \text{ cm}.$$

Para ver si en este punto hay un mínimo aplicamos el [criterio de la segunda derivada](#).

$$s''(r) = \frac{8}{3}\pi - \frac{0.3(-2)}{r^3} = \frac{8}{3}\pi + \frac{0.6}{r^3} > 0 \quad \forall r > 0.$$

Por tanto,  $s$  tiene un mínimo local en  $r = 0.3296$ , y la altura del la píldora con la mínima superficie será, utilizando la Ecuación 2.1,

$$h = \frac{0.15 - \frac{4}{3}\pi 0.3296^3}{\pi 0.3296^2} \approx 0.$$

Así pues, las dimensiones óptimas serían  $x = h = 0$  cm e  $y = 2r = 0.6592$  cm, que en realidad es una esfera de diámetro 0.6592 cm.

**Ejercicio 2.9.** Demostrar que la función  $f(x) = \ln(k(x^2 - 2x + \frac{3}{2}))$  no puede tener más de una raíz en el intervalo  $(0, 1)$  para cualquier valor de  $k$ .

### 💡 Solución

$x^2 - 2x + \frac{3}{2} > 0 \quad \forall x \in \mathbb{R}$ , de manera que, para que exista la función  $f$ , debe ser también  $k > 0$  y, por tanto, aplicando propiedades de logaritmos se tiene,

$$f(x) = \ln(k(x^2 - 2x + \frac{3}{2})) = \ln(k) + \ln(x^2 - 2x + \frac{3}{2}).$$

Por otro lado, como  $x^2 - 2x + \frac{3}{2}$  es un polinomio, es continuo en todo  $\mathbb{R}$ , y por tanto,  $f(x)$  también es continua en todo  $\mathbb{R}$ , siempre que  $k > 0$ .

Demostraremos que  $f$  no puede tener más de una raíz en el intervalo  $(0, 1)$  por reducción al absurdo. Supongamos que existen  $0 < a < b < 1$  tales que  $f(a) = f(b) = 0$ . Entonces, aplicando el [teorema de Rolle](#), debe existir algún valor  $c \in (a, b)$  tal que  $f'(c) = 0$ . Si calculamos los puntos críticos de  $f$  se tiene

$$f'(x) = \frac{2x - 2}{x^2 - 2x + 3/2} = 0 \Leftrightarrow 2x - 2 = 0 \Leftrightarrow x = 1,$$

pero como  $1 \notin (a, b)$ , llegamos a una contradicción ya que no existe ningún valor  $c \in (a, b)$  con  $f'(c) = 0$ . Así pues,  $f$  no puede tener más de una raíz en el intervalo  $(0, 1)$ .

**Ejercicio 2.10.** Calcular las ecuaciones de las rectas tangente y normal a la gráfica de la curva implícita  $e^{x^2y} - \ln(\sqrt{x-y}) = 0$  en el punto  $x = 0$ .

### 💡 Solución

En primer lugar obtenemos los valores de  $y$  que cumplen la ecuación de la curva implícita para  $x = 0$ . Sustituyendo en la ecuación se tiene

$$\begin{aligned} e^{0^2y} - \ln(\sqrt{0-y}) &= 0 \Leftrightarrow 1 - \ln(\sqrt{-y}) = 0 \Leftrightarrow \\ \ln(\sqrt{-y}) &= 1 \Leftrightarrow \sqrt{-y} = e \Leftrightarrow y = -e^2. \end{aligned}$$

Así pues, hay que calcular la ecuación de las rectas tangente y normal en el punto  $(0, -e^2)$ .

Como la pendiente de la recta tangente es la tasa de variación instantánea, calculamos  $y' = \frac{dy}{dx}$  implícitamente

$$\begin{aligned} (e^{x^2y} - \ln(\sqrt{x-y}))' &= 0' \Leftrightarrow \left(e^{x^2y} - \frac{1}{2}\ln(x-y)\right)' = 0 \Leftrightarrow \\ e^{x^2y}(2xy + x^2y') - \frac{1}{2} \frac{1-y'}{x-y} &= 0. \end{aligned}$$

Sustituyendo en  $x = 0$  y  $y = -e^2$ , se tiene

$$\begin{aligned} e^{0^2(-e^2)}(2 \cdot 0(-e^2) + 0^2y') - \frac{1}{2} \frac{1-y'}{0 - (-e^2)} &= 0 \\ \Leftrightarrow \frac{-(1-y')}{2e^2} &= 0 \Leftrightarrow 1 - y' = 0 \Leftrightarrow y' = 1. \end{aligned}$$

Por tanto, la ecuación de la recta tangente a la curva en  $(0, -e^2)$  es

$$y = y_0 + \frac{dy}{dx}(x_0, y_0)(x - x_0) = (-e^2) + 1(x - 0) = x - e^2.$$

Y la ecuación de la recta normal a la curva en  $(0, -e^2)$  es

$$y = y_0 - \frac{1}{\frac{dy}{dx}(x_0, y_0)}(x - x_0) = (-e^2) - 1(x - 0) = -x - e^2.$$

### 3 2023-03-11 Examen de Análisis II

**Ejercicio 3.1.** Estudiar la convergencia de las siguientes series

- $\sum \frac{3n^2 + 2n}{\sqrt{n^5 + n}}$
- $\sum \cos(n\pi)n^2e^{-n}$

#### 💡 Solución

- a. Se trata de una serie de términos positivos en la que el término dominante en el numerador es  $3n^2$  y el término dominante en el denominador es  $n^{5/2}$ , por lo que podemos utilizar el [criterio del cociente](#) para compararla con la serie  $\sum \frac{3n^2}{n^{5/2}}$ .

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{3n^2+2n}{\sqrt{n^5+n}}}{\frac{3n^2}{n^{5/2}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{3n^2+2n}{3n^2} \frac{\sqrt{n^5+n}}{\sqrt{n^5}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{3n^2+2n}{3n^2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{n^5+n}}{\sqrt{n^5}} = 1$$

Por tanto, la serie  $\sum \frac{3n^2+2n}{\sqrt{n^5+n}}$  tiene el mismo comportamiento que la serie  $\sum \frac{3n^2}{n^{5/2}}$ , y como  $\sum \frac{3n^2}{n^{5/2}} = 3 \sum \frac{1}{n^{1/2}}$  es una serie  $p$  con  $p < 1$ , diverge, por lo que la serie  $\sum \frac{3n^2+2n}{\sqrt{n^5+n}}$  también diverge.

- b. Se trata de una serie alternada ya que  $\sum \cos(n\pi)n^2e^{-n} = \sum (-1)^n n^2 e^{-n}$  por lo que aplicando el [criterio de la serie alternada](#), como  $n^2 e^{-n}$  es monótona decreciente para  $n \geq 2$  y

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n^2 e^{-x} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^2}{e^x} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2n}{e^x} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2}{e^x} = 0, \quad (\text{L'Hôpital})$$

se concluye que la serie  $\sum \cos(n\pi)n^2e^{-n}$  converge.

**Ejercicio 3.2.** Un pozo de petróleo produce 200 mil litros de petróleo el primer año de su explotación, pero cada año que pasa la producción decae un 12%. Calcular la cantidad de petróleo extraída tras  $n$  años de actividad. ¿Qué cantidad total de petróleo se extraerá del pozo hasta agotarlo?

### Solución

La producción anual evoluciona según la sucesión

$$\begin{aligned}a_1 &= 200 \\a_2 &= a_1(1 - 0.12) = 200 \cdot 0.88 \\a_3 &= a_2 \cdot 0.88 = 200 \cdot 0.88^2 \\\vdots \\a_n &= 200 \cdot 0.88^{n-1}\end{aligned}$$

por lo que la producción acumulada viene dada por la serie  $\sum 200 \cdot 0.88^{n-1}$  que es una serie geométrica de razón 0.88. Así pues, la cantidad de petróleo extraída tras  $n$  años es

$$A_n = \sum_{i=0}^{n-1} 200 \cdot 0.88^i = 200 \frac{1 - 0.88^n}{1 - 0.88},$$

y la cantidad total de petróleo que se extraerá del pozo hasta agotarlo viene dada por la suma

$$\sum_{n=0}^{\infty} 200 \cdot 0.88^n = \frac{200}{1 - 0.88} \approx 1666.6667 \text{ mil litros.}$$

**Ejercicio 3.3.** Determinar el dominio de convergencia puntual de la serie de potencias

$$\sum \frac{n(x-3)^n}{(n+1)4^n}$$

### Solución

Para determinar el radio de convergencia de la serie de potencias podemos usar el [criterio de la raíz](#), que establece que

$$R = \frac{1}{\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|c_n|}}$$

Como

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|c_n|} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\frac{n}{(n+1)4^n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{4} \sqrt[n]{\frac{n}{(n+1)}} = \frac{1}{4},$$

se concluye que  $R = \frac{1}{1/4} = 4$ , de manera que la serie converge para  $|x - 3| < 4$ , es decir, en el intervalo  $(-1, 7)$ .

Veamos ahora si la serie converge en los extremos del intervalo.

En  $x = 7$  se tiene la serie  $\sum \frac{n4^n}{(n+1)4^n} = \sum \frac{n}{n+1}$ , que diverge al ser  $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{n+1} = 1 \neq 0$ .

Y en  $x = -1$  se tiene la serie  $\sum \frac{n(-4)^n}{(n+1)4^n} = \sum (-1)^n \frac{n}{n+1}$ , que es una serie alternada, pero también diverge al ser  $(\frac{n}{n+1})_{n=1}^{\infty}$  una sucesión monótona creciente.

Por tanto, el dominio de convergencia puntual de la serie de potencias es  $\mathcal{C} = (-1, 7)$ .

**Ejercicio 3.4.** Calcular la serie de Taylor de la función  $f(x) = \frac{1}{x}$  en  $a = 1$ . ¿Cuál es su dominio de convergencia puntual?

### 💡 Solución

Calculamos las primeras derivadas para obtener la expresión de la derivada de orden  $n$ .

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{1}{x} = x^{-1} & f(1) &= 1^{-1} = 1, \\ f'(x) &= (-1)x^{-2} & f'(1) &= (-1)1^{-2} = -1, \\ f''(x) &= 2x^{-3} & f''(1) &= 2 \cdot 1^{-3} = 2, \\ f'''(x) &= (-1)3!x^{-4} & f'''(1) &= (-1)3!1^{-4} = -3!, \\ \vdots f^{(n)}(x) &= (-1)^{n+1}n!x^{-(n+1)} & f^{(n)}(1) &= (-1)^{n+1}n! \end{aligned}$$

Así pues, sustituyendo en la [fórmula de la serie de Taylor](#) se obtiene la serie

$$\sum \frac{f^n(1)}{n!}(x-1)^n = \sum \frac{(-1)^{n+1}n!}{n!}(x-1)^n = \sum (-1)^{n+1}(x-1)^n.$$

Su radio de convergencia puntual se obtiene fácilmente mediante el criterio de la razón

$$R = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{c_n}{c_{n+1}} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{(-1)^{n+1}}{(-1)^{n+2}} \right| = 1,$$

por lo que la serie converge en  $|x - 1| < 1$ , es decir, en el intervalo  $(0, 2)$ . Veamos ahora si converge en los extremos.

En  $x = 0$  se tiene la serie  $\sum (-1)^{n+1}(-1)^n = \sum (-1)^{2n+1} = \sum -1$  que diverge, mientras que en  $x = 2$  se tiene la serie  $\sum (-1)^{n+1}1^n = \sum (-1)^{n+1}$  que también diverge ya que no existe el límite  $\lim_{n \rightarrow \infty} (-1)^{n+1}$ .

Así pues, se concluye que el dominio de convergencia puntual de la serie de Taylor es  $\mathcal{C} = (0, 2)$ .

**Ejercicio 3.5.** Calcular la integral superior de Riemann de la función  $f(x) = 2x^3 + 3x$  en el intervalo  $[0, 2]$ .

### Solución

Si dividimos el intervalo  $[0, 2]$  en  $n$  subintervalos de igual amplitud, obtenemos la partición  $P_n = \{x_0 = 0, x_1, \dots, x_n = 2\}$  con  $x_i = \frac{2i}{n}$  para  $i = 1, \dots, n$ .

Como la función  $f(x) = 2x^3 + 3x$  es creciente en el intervalo  $[0, 2]$  el máximo de  $f$  en cada subintervalo  $(x_{i-1}, x_i)$  se alcanzará en el extremo superior, de manera que la suma superior de Riemann de  $f$  respecto de  $P_n$  es

$$\begin{aligned} S(f, P_n) &= \sum_{i=1}^n f(x_i)(x_i - x_{i-1}) = \sum_{i=1}^n \left( 2\left(\frac{2i}{n}\right)^3 + 3\frac{2i}{n} \right) \frac{2}{n} \\ &= \sum_{i=1}^n \left( \frac{16i^3}{n^3} + \frac{6i}{n} \right) \frac{2}{n} = \frac{32}{n^4} \sum_{i=1}^n i^3 + \frac{12}{n^2} \sum_{i=1}^n i \\ &= \frac{32}{n^4} \left( \frac{n(n+1)}{2} \right)^2 + \frac{12}{n^2} \frac{n(n+1)}{2} = \frac{32}{n^4} \frac{n^4 + 2n^3 + n^2}{4} + 6 \frac{n+1}{n} \\ &= 8 \frac{n^4 + 2n^3 + n^2}{n^4} + 6 \frac{n+1}{n}. \end{aligned}$$

Así pues, la integral superior de Riemann es

$$\begin{aligned} \overline{\int_0^2} f &= \lim_{n \rightarrow \infty} S(f, P_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} 8 \frac{n^4 + 2n^3 + n^2}{n^4} + 6 \frac{n+1}{n} \\ &= 8 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^4 + 2n^3 + n^2}{n^4} + 6 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n+1}{n} = 8 + 6 = 14. \end{aligned}$$

# 4 2023-06-01 Examen de Análisis II

## 4.1 Primera parte

**Ejercicio 4.1.** Calcular las siguientes sumas si existen

a.  $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{2}{n^2 - 1}$ .

b.  $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\sqrt{n}}{\ln(n)}$ .

 Solución

a.  $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{2}{n^2 - 1}$  es una serie  $p$  con  $p > 1$  por lo que la serie converge, pero para calcular su suma vamos a reescribir el término general como suma de fracciones simples.

$$\sum_{n=2}^{\infty} \frac{2}{n^2 - 1} = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{2}{(n+1)(n-1)} = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n-1} - \frac{1}{n+1},$$

que es una serie telescópica, de manera que

$$\sum_{n=2}^{\infty} \frac{2}{n^2 - 1} = 1 + \frac{1}{2} + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2}{n^2 - 1} = \frac{3}{2}.$$

b.  $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\sqrt{n}}{\ln(n)}$  es una serie alternada, pero

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{n}}{\ln(n)} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{2\sqrt{n}}}{\frac{1}{n}} && (\text{L'Hôpital}) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{2\sqrt{n}} = \infty, \end{aligned}$$

por lo que la serie diverge.

**Ejercicio 4.2.** Considérese el conjunto de Cantor que resulta de ir eliminando del intervalo  $[0, 10]$ , de manera recursiva, el 80% central de los intervalos restantes. El procedimiento sería el siguiente:

- Etapa 1: Se elimina el intervalo  $(1, 9)$ .
- Etapa 2: Se eliminan los intervalos  $(0.1, 0.9)$  y  $(9.1, 9.9)$ .
- Etapa 3: Se eliminan los intervalos  $(0.01, 0.09)$ ,  $(0.91, 0.99)$ ,  $(9.01, 9.09)$  y  $(9.91, 9.99)$ .
- ...

¿Cuál es la longitud total de los intervalos eliminados?

### 💡 Solución

En la primera etapa se elimina el intervalo  $(1, 9)$ , que tiene longitud 8. En la segunda etapa se eliminan 2 intervalos,  $(0.1, 0.9)$  y  $(9.1, 9.9)$ , ambos con amplitud 0.8, y por tanto, la longitud de los intervalos eliminados es  $2 \cdot 0.8$ . En la tercera etapa se eliminan 4 intervalos,  $(0.01, 0.09)$ ,  $(0.91, 0.99)$ ,  $(9.01, 9.09)$  y  $(9.91, 9.99)$ , ambos con amplitud 0.08, y por tanto, la longitud de los intervalos eliminados es  $4 \cdot 0.08$ . En general, en la etapa  $n$  se eliminan  $2^{n-1}$  intervalos, todos con amplitud  $\frac{8}{10^{n-1}}$ , y por tanto, la longitud de los intervalos eliminados es  $2^{n-1} \frac{8}{10^{n-1}}$ . Así pues, la suma de las longitudes de los intervalos eliminados viene dada por la serie

$$\sum_{n=1}^{\infty} 2^{n-1} \frac{8}{10^{n-1}} = \sum_{n=0}^{\infty} 2^n \frac{8}{10^n} = 8 \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{2}{10}\right)^n,$$

que es una serie geométrica de razón  $\frac{2}{10} < 1$ , por lo que converge y su suma vale

$$8 \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{2}{10}\right)^n = 8 \frac{1}{1 - \frac{2}{10}} = 8 \frac{10}{8} = 10.$$

**Ejercicio 4.3.** La distribución de Borel de parámetro  $\mu \geq 0$  es una distribución de probabilidad discreta con recorrido  $\mathbb{N}$  y función de probabilidad  $f(n)$

$$f(n) = \frac{(\mu n)^{n-1}}{e^{\mu n} n!} \quad \forall n \in \mathbb{N},$$

¿Para qué valores de  $\mu$  la serie  $\sum f(n)$  es absolutamente convergente?

### Solución

Para estudiar la convergencia absoluta de la serie  $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu n)^{n-1}}{e^{\mu n} n!}$ , aplicamos el criterio de la razón.

$$\begin{aligned}\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{(\mu(n+1))^n}{e^{\mu(n+1)}(n+1)!}}{\frac{(\mu n)^{n-1}}{e^{\mu n} n!}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\mu^n (n+1)^n e^{\mu n} n!}{\mu^{n-1} n^{n-1} e^{\mu(n+1)} (n+1)!} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\mu(n+1)(n+1)^{n-1} e^{\mu n} n!}{n^{n-1} e^{\mu} e^{\mu n} (n+1)n!} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\mu}{e^{\mu}} \left( \frac{n+1}{n} \right)^{n-1} \\ &= \frac{\mu}{e^{\mu}} \lim_{n \rightarrow \infty} \left( 1 + \frac{1}{n} \right)^{n-1} = \frac{\mu}{e^{\mu}} e = \frac{\mu}{e^{\mu-1}}.\end{aligned}$$

Como  $\frac{\mu}{e^{\mu-1}} < 1 \Leftrightarrow \mu < e^{\mu-1}$ , es cierto para cualquier  $\mu \geq 0$  excepto para  $\mu = 1$ , la serie converge absolutamente  $\forall \mu \geq 0, \mu \neq 1$ . Para  $\mu = 1$  el criterio de la razón no es concluyente.

**Ejercicio 4.4.** Calcular la integral inferior de Riemann de la parábola  $f(x) = 3x^2 + 2x$  en el intervalo  $[0, 10]$ .

### Solución

Si dividimos el intervalo  $[0, 1]$  en  $n$  subintervalos de igual amplitud obtenemos la partición  $P_n = \{x_0 = 0, x_1, \dots, x_n = 10\}$  con  $x_i = \frac{10i}{n} \forall i = 1, \dots, n$ . Como la función  $f(x) = 3x^2 + 2x$  es creciente en el intervalo  $[0, 10]$ , el mínimo de  $f$  en cada subintervalo  $[x_{i-1}, x_i]$  se alcanzará en el extremo inferior, de manera que la suma inferior de Riemann de  $f$  con respecto a  $P_n$  es

$$\begin{aligned}
s(f, P_n) &= \sum_{i=1}^n f(x_{i-1})(x_i - x_{i-1}) \\
&= \sum_{i=1}^n \left( 3 \left( \frac{10(i-1)}{n} \right)^2 + 2 \left( \frac{10(i-1)}{n} \right) \right) \frac{10}{n} \\
&= \frac{10}{n} \left( \sum_{i=1}^n \frac{300}{n^2} (i-1)^2 + \sum_{i=1}^n \frac{20}{n} (i-1) \right) \\
&= \frac{3000}{n^3} \sum_{i=1}^n (i-1)^2 + \frac{200}{n^2} \sum_{i=1}^n (i-1) \\
&= \frac{3000}{n^3} \sum_{i=1}^n i^2 + 2i + 1 + \frac{200}{n^2} \sum_{i=1}^n (i-1) \\
&= \frac{3000}{n^3} \left( \sum_{i=1}^n i^2 - 2 \sum_{i=1}^n i + \sum_{i=1}^n 1 \right) + \frac{200}{n^2} \left( \sum_{i=1}^n i - \sum_{i=1}^n 1 \right) \\
&= \frac{3000}{n^3} \left( \frac{n(n+1)(2n+1)}{6} - 2 \frac{n(n+1)}{2} + n \right) + \frac{200}{n^2} \left( \frac{n(n+1)}{2} - n \right) \\
&= \frac{3000}{n^3} \left( \frac{n^3}{3} + \frac{n^2}{2} + \frac{n}{6} - n^2 - n + n \right) + \frac{200}{n^2} \left( \frac{n^2}{2} + \frac{n}{2} - n \right) \\
&= 500 \left( \frac{2n^3 - 3n^2 + n}{n^3} \right) + 100 \left( \frac{n^2 - n}{n^2} \right).
\end{aligned}$$

Y la integral inferior de Riemann es

$$\begin{aligned}
\int_0^{10} f &= \lim_{n \rightarrow \infty} s(f, P_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} 500 \left( \frac{2n^3 - 3n^2 + n}{n^3} \right) + 100 \left( \frac{n^2 - n}{n^2} \right) \\
&= 500 \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{2n^3 - 3n^2 + n}{n^3} \right) + 100 \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{n^2 - n}{n^2} \right) \\
&= 500 \cdot 2 + 100 = 1100.
\end{aligned}$$

## 4.2 Segunda parte

**Ejercicio 4.5.** La función  $f(t) = 50\sqrt{t/2} + 100$  da los ingresos de una empresa en miles de euros  $t$  años después de su creación, mientras que la función  $g(t) = \ln(t^2 + 1) + 100$  da los gastos. Calcular el beneficio acumulado de la empresa entre el quinto y el décimo año.

### 💡 Solución

Para obtener el beneficio acumulado de la empresa entre el quinto y décimo año tenemos que calcular la integral definida de la función de los ingresos menos la de los gastos en el intervalo  $[5, 10]$ , es decir,

$$\begin{aligned}\int_5^{10} f(t) - g(t) dt &= \int_5^{10} 50\sqrt{t/2} + 100 - \ln(t^2 + 1) - 100 dt \\ &= \frac{50}{\sqrt{2}} \int_5^{10} t^{1/2} dt - \int_5^{10} \ln(t^2 + 1) dt.\end{aligned}$$

Vamos a calcular estas dos integrales por separado.

$$\int_5^{10} t^{1/2} dt = \left[ \frac{t^{3/2}}{3/2} \right]_0^{10} = \frac{2}{3}(10^{3/2} - 5^{3/2}) \approx 13.6283.$$

y

$$\begin{aligned}\int_5^{10} \ln(t^2 + 1) dt &= [t \ln(t^2 + 1)]_5^{10} - \int_5^{10} t \frac{2t}{t^2 + 1} dt \quad (\text{Partes}) \\ &= [t \ln(t^2 + 1)]_5^{10} - 2 \int_5^{10} 1 - \frac{1}{t^2 + 1} dt \\ &= [t \ln(t^2 + 1)]_5^{10} - [2t]_5^{10} + [2 \operatorname{arctg}(t)]_5^{10} \\ &= 10 \ln(10^2 + 1) - 5 \ln(5^2 + 1) - 2 \cdot 10 + 2 \cdot 5 + 2 \operatorname{arctg}(10) - 2 \operatorname{arctg}(5) \\ &\approx 20.0562.\end{aligned}$$

Así pues el beneficio acumulado es

$$\int_5^{10} f(t) - g(t) dt \approx \frac{50}{\sqrt{2}} \cdot 13.6283 - 20.0562 = 461.7768 \text{ miles de €}.$$

**Ejercicio 4.6.** Calcular el área de región encerrada por la curva polar  $r = 2 \cos(\theta) \operatorname{sen}(\theta)$ .

### 💡 Solución

La función  $r = 2 \cos(\theta) \operatorname{sen}(\theta)$  tiene periodo  $\pi$ , pero para describir la curva completa es necesario que  $\theta$  recorra la circunferencia entera, por lo que el intervalo de integración es  $[0, 2\pi]$  y, por tanto, para calcular el [área encerrada por esta curva polar](#) tenemos que calcula la siguiente integral.

$$\begin{aligned}
\int_0^{2\pi} \frac{r^2}{2} d\theta &= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} 2 \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta \\
&= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \sin(2\theta)^2 d\theta = \frac{1}{4} \int_0^{4\pi} \sin(x)^2 dx \quad (\text{Cambio } x = 2\theta) \\
&= \frac{1}{4} \int_0^{4\pi} \frac{1 - \cos(2x)}{2} dx = \frac{1}{8} \int_0^{4\pi} dx - \int_0^{4\pi} \cos(2x) dx \\
&= \frac{1}{8} \left( [x]_0^{4\pi} - \left[ \frac{1}{2} \sin(2x) \right]_0^{4\pi} \right) \\
&= \frac{1}{8} 4\pi = \frac{\pi}{2}.
\end{aligned}$$

**Ejercicio 4.7.** Calcular el volumen del depósito generado al rotar alrededor del eje  $y$  la gráfica de la función  $f(x) = (x - 1)^2$  con  $0 \leq x \leq 3$ . Plantear la integral para obtener la cantidad de chapa necesaria para su construcción, sin llegar a calcularla.

### 💡 Solución

Para calcular el volumen del sólido de revolución generado al rotar alrededor del eje  $y$  la gráfica de la función  $f(x) = (x - 1)^2$  en el intervalo  $[0, 3]$  utilizaremos [envoltorios cilíndricos](#), de manera que el volumen viene dado por la integral

$$\begin{aligned}
\int_0^3 2\pi x f(x) dx &= 2\pi \int_0^3 x(x - 1)^2 dx = 2\pi \int_0^3 x(x^2 - 2x + 1) dx \\
&= 2\pi \int_0^3 x^3 - 2x^2 + x dx = 2\pi \left[ \frac{x^4}{4} - 2\frac{x^3}{3} + \frac{x^2}{2} \right]_0^3 \\
&= 2\pi \left( \frac{3^4}{4} - 2\frac{3^3}{3} + \frac{3^2}{2} \right) = \frac{27\pi}{2} \text{ unidades}^3.
\end{aligned}$$

Por otro lado, la chapa necesaria para su construcción viene dada por la superficie del sólido de revolución y para calcular el [área de la superficie de un sólido de revolución](#) cuando la gráfica de  $f$  se rota alrededor del eje  $x$  se utiliza la integral

$$\int_0^3 2\pi f(x) \sqrt{1 + f'(x)^2} dx$$

Sin embargo, como la gráfica de  $f$  se rota alrededor del eje  $y$ , el radio del los troncos de conos que resultan al tomar particiones del intervalo y aproximaciones de Riemann, en lugar de ser  $y = f(x)$ , es  $x$ , por lo que la integral que hay que calcular es

$$\int_0^3 2\pi x \sqrt{1 + f'(x)^2} dx = 2\pi \int_0^3 x \sqrt{1 + (2(x-1))^2} dx.$$

**Ejercicio 4.8.** La gran pirámide de Gizeh tiene una altura de 138 m y una base cuadrada de lado 230 m. Calcular de manera aproximada el trabajo realizado en su construcción. Supóngase que la densidad de las piedras usadas en su construcción es de 2500 kg/m<sup>3</sup> y que la aceleración de la gravedad es 9.81 m/s<sup>2</sup>.

### Solución

Supongamos que base de la pirámide está centrada en el origen de coordenadas del plano  $XZ$ . Entonces, la ecuación de la recta en la que queda inscrito el apotema de la pirámide es  $y = 138 - \frac{138}{115}x$  de manera que  $x = \frac{115}{138}(138 - y) = 115 - \frac{5}{6}y$ . Para calcular el trabajo realizado en la construcción de la pirámide, calcularemos el trabajo realizado para las secciones transversales de la pirámide con respecto al eje  $y$ , que serán cuadrados de lado  $2x$ , y por tanto tendrán área

$$A_i = \left(2\left(115 - \frac{5}{6}y\right)\right)^2 = \left(230 - \frac{5}{3}y\right)^2 = 52900 - \frac{2300}{3}y + \frac{25}{9}y^2 \text{ m}^2.$$

Si la altura de cada una de estas secciones transversales es  $\Delta y$ , su volumen es

$$V_i = A_i \Delta y = \left(52900 - \frac{2300}{3}y + \frac{25}{9}y^2\right) \Delta y \text{ m}^3.$$

A partir del volumen de cada sección transversal podemos calcular su masa multiplicando por la densidad de la piedra.

$$M_i = V_i \delta = 2500 \left(52900 - \frac{2300}{3}y + \frac{25}{9}y^2\right) \Delta y \text{ kg.}$$

Así pues, la fuerza necesaria para mover la masa de cada una de estas secciones transversales es

$$F_i = M_i g = 9.81 \cdot 2500 \left(52900 - \frac{2300}{3}y + \frac{25}{9}y^2\right) \Delta y \text{ N,}$$

Finalmente, como cada sección transversal debe elevarse una altura  $y$ , el trabajo realizado al mover la masa correspondiente a la sección transversal es

$$W_i = F_i y = 9.81 \cdot 2500 y \left(52900 - \frac{2300}{3}y + \frac{25}{9}y^2\right) \Delta y \text{ J.}$$

Así pues, el trabajo total será la suma de los trabajos realizados al desplazar las infinitas secciones transversales desde la base de la pirámide hasta su cima, es decir, en el intervalo  $y \in [0, 138]$ , que viene dado por la integral

$$\begin{aligned}
W &= \int_0^{138} 9.81 \cdot 2500y \left( 52900 - \frac{2300}{3}y + \frac{25}{9}y^2 \right) dy \\
&= 24525 \int_0^{138} 52900y - \frac{2300}{3}y^2 + \frac{25}{9}y^3 dy \\
&= 24525 \left[ 52900 \frac{y^2}{2} - \frac{2300}{3} \frac{y^3}{3} + \frac{25}{9} \frac{y^4}{4} \right]_0^{138} \\
&= 24525 \left( 26450 \cdot 138^2 - \frac{2300}{9} 138^3 + \frac{25}{36} 138^4 \right) \approx 2058930157500 \text{ J}.
\end{aligned}$$

## 5 2023-11-15 Examen de Análisis I

**Ejercicio 5.1.** Sea  $(x_n)_{n=1}^{\infty}$  una sucesión tal que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_{2n} = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{2n+1} = l.$$

Demostrar que  $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = l$ .

### Solución

Por la definición de límite, como  $\lim_{n \rightarrow \infty} x_{2n} = l$ ,  $\forall \varepsilon > 0 \exists k_1 \in \mathbb{N}$  tal que si  $2n \geq k_1$  entonces  $|x_{2n} - l| < \varepsilon$ .

Del mismo modo, como  $\lim_{n \rightarrow \infty} x_{2n+1} = l$ ,  $\forall \varepsilon > 0 \exists k_2 \in \mathbb{N}$  tal que si  $2n + 1 \geq k_2$  entonces  $|x_{2n+1} - l| < \varepsilon$ .

Tomando ahora  $k = \max\{k_1, k_2\}$ , si  $m \geq k$ , entonces o  $m$  es par, o  $m$  es impar. Si  $m$  es par entonces existe  $n \in \mathbb{N}$  tal que  $m = 2n$  y como  $m = 2n \geq k \geq k_1$ , se tiene que  $|x_m - l| = |x_{2n} - l| < \varepsilon$ . Y si  $m$  es impar entonces existe  $n \in \mathbb{N}$  tal que  $m = 2n + 1$  y como  $m = 2n + 1 \geq k \geq k_2$ , se tiene que  $|x_m - l| = |x_{2n+1} - l| < \varepsilon$ . Por tanto,  $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = l$ .

**Ejercicio 5.2.** La cantidad de agua almacenada en un embalse en hectómetros cúbicos viene dada por la función

$$h(t) = \frac{10t + \cos(2t)}{4t + 2 \sin(3t)}$$

Analizar si la cantidad de agua converge o no a largo plazo.

### Solución

Como  $-1 \leq \sin(3t) \leq 1$  y  $-1 \leq \cos(2t) \leq 1 \quad \forall t \in \mathbb{R}$ , en particular, para  $t > 1$  se tiene que

$$\begin{aligned} 0 < 10t - 1 &\leq 10t + \cos(2t) \leq 10t + 1 \\ 0 < 4t - 2 &\leq 4t + 2 \sin(3t) \leq 4t + 2 \end{aligned}$$

y por tanto

$$\frac{10t - 1}{4t + 2} \leq \frac{10t + \cos(2t)}{4t + 2 \sin(3t)} \leq \frac{10t + 1}{4t - 2}.$$

Como además, aplicando álgebra de límites,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{10t - 1}{4t + 2} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\frac{10t - 1}{t}}{\frac{4t + 2}{t}} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{10 - \frac{1}{t}}{4 + \frac{2}{t}} = \frac{10}{4},$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{10t + 1}{4t - 2} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\frac{10t + 1}{t}}{\frac{4t - 2}{t}} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{10 + \frac{1}{t}}{4 - \frac{2}{t}} = \frac{10}{4},$$

por el [teorema de compresión de funciones](#), se tiene que

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{10t + \cos(2t)}{4t + 2 \sin(3t)} = \frac{10}{4}.$$

Otra forma de verlo sería dividiendo numerador y denominador por  $t$

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{10t + \cos(2t)}{4t + 2 \sin(3t)} &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\frac{10t + \cos(2t)}{t}}{\frac{4t + 2 \sin(3t)}{t}} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{10 + \frac{\cos(2t)}{t}}{4 + \frac{2 \sin(3t)}{t}} \\ &= \frac{\lim_{t \rightarrow \infty} 10 + \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\cos(2t)}{t}}{\lim_{t \rightarrow \infty} 4 + \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{2 \sin(3t)}{t}}. \end{aligned}$$

Ahora bien, como  $-1 \leq \cos(2t) \leq 1$ , se tiene que

$$\frac{-1}{t} \leq \frac{\cos(2t)}{t} \leq \frac{1}{t},$$

y como  $\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{-1}{t} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} = 0$ , por el teorema de compresión de funciones se tiene que  $\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\cos(2t)}{t} = 0$ .

Del mismo modo se puede probar que  $\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{2 \sin(3t)}{t} = 0$ , por lo que finalmente se tiene que

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{10t + \cos(2t)}{4t + 2 \sin(3t)} = \frac{10 + 0}{4 + 0} = 2.5.$$

Así pues, a largo plazo, la cantidad de agua en el embalse converge a  $2.5 \text{ Hm}^3$ .

**Ejercicio 5.3.** Dado el conjunto  $A = \{\frac{\sin(n)}{n}, n \in \mathbb{N}\}$ ,

- a. Calcular su ínfimo, mínimo, supremo y máximo si existen.
- b. Calcular sus puntos de acumulación.
- c. Estudiar si se trata de un conjunto abierto o cerrado.

 Solución

- a. Los elementos del conjunto están más cerca de 0 a medida que  $n$  crece, aunque irán alternando el signo, ya que  $-1 \leq \sin(n) \leq 1 \forall n \in \mathbb{N}$ , por tanto el conjunto estará acotado tanto inferior como superiormente. Si calculamos de manera aproximada los primeros elementos del conjunto para  $n = 1, \dots, 10$ , tenemos

$n$	$\frac{\sin(n)}{n}$
1	0.8415
2	0.4546
3	0.0470
4	-0.1892
5	-0.1917
6	-0.04656
7	0.0938
:	:

A partir de aquí los valores se van acercando cada vez más a 0 ya que  $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sin(n)}{n} = 0$ . Por tanto, el máximo valor del  $A$  es el correspondiente a  $n = 1$ , es decir,  $\sin(1) \approx 0.8415$ , y el mínimo corresponde a  $n = 5$ , es decir  $\sin(5)/5 \approx -0.1917$ . Y como el mínimo y el máximo existen, coinciden con el ínfimo y el supremo, respectivamente.

- b. Como los valores del conjunto están cada vez más cerca de 0, este será un punto de acumulación. Para demostrarlo basta con ver que  $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sin(n)}{n} = 0$ , ya que, como  $-1 \leq \sin(x) \leq 1 \forall n \in \mathbb{N}$ , se tiene que

$$\frac{-1}{n} \leq \frac{\sin(n)}{n} \leq \frac{1}{n}$$

y como  $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{-1}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} = 0$ , y por el teorema de compresión de sucesiones se tiene que  $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sin(n)}{n} = 0$ , y por tanto, se cumple que  $\forall \varepsilon > 0$  existe  $k \in \mathbb{N}$  tal que  $\left| \frac{\sin(n)}{n} - 0 \right| < \varepsilon$ , por lo que podemos encontrar puntos de  $A$  tan cerca de 0 como queramos y 0 es un punto de acumulación.

Veamos ahora que 0 es el único punto de acumulación de  $A$ , es decir, que cualquier otro punto  $x \neq 0$  no es punto de acumulación. Supongamos que  $x \neq 0$  es un punto de acumulación de  $A$ , entonces es posible construir una sucesión de puntos  $(a_n)_{n=1}^{\infty}$  tal que  $a_n \in A$  y  $a_n \neq x \forall n \in \mathbb{N}$ , que converge a  $x$ . Pero, por otro lado, como  $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sin(n)}{n} = 0$ , cualquier subsucesión de la sucesión  $\left( \frac{\sin(n)}{n} \right)$  converge a 0, y en particular la sucesión  $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ , por lo que  $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$ , lo cual es contradictorio con que  $x \neq 0$ .

- c.  $A$  no puede ser cerrado porque  $0$  es un punto de acumulación suyo pero  $0 \notin A$  (ver [teorema](#)). Pero  $A$  tampoco es abierto porque sus puntos son aislados, es decir, para cualquier  $n \in \mathbb{N}$ , y  $\forall \varepsilon > 0$  el intervalo  $\left(\frac{\operatorname{sen}(n)}{n} - \varepsilon, \frac{\operatorname{sen}(n)}{n} + \varepsilon\right)$  siempre contiene puntos que no son de  $A$ .

**Ejercicio 5.4.** Dada la función  $f(x) = \frac{ax^n}{x^2 + bx}$ ,

- ¿Cuánto debe valer  $a$ ,  $b$  y  $n$  para que  $f$  tenga una asíntota vertical  $x = 3$  y una asíntota horizontal  $y = 2$ ?
- ¿Cuánto debe valer  $a$ ,  $b$  y  $n$  para que  $f$  tenga una asíntota oblicua  $y = 3x - 1$ ?

#### Solución

- a. Para que  $f$  tenga una asíntota vertical en  $x = 3$  debe anularse el denominador, es decir,  $3^2 + 3b = 0$ , de donde se deduce que  $b = -3$ , ya que

$$\lim_{x \rightarrow 3^-} \frac{ax^n}{x^2 - 3x} = \infty$$

$$\lim_{x \rightarrow 3^+} \frac{ax^n}{x^2 - 3x} = -\infty$$

Y para que  $f$  tenga una asíntota horizontal  $y = 2$ , debe ser  $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{ax^n}{x^2 - 3x} = 2$ , y para ello es necesario que el grado del polinomio del numerador sea igual al grado del polinomio del denominador, es decir,  $n = 2$ . En tal caso,

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{ax^2}{x^2 - 3x} = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{\frac{ax^2}{x^2}}{\frac{x^2 - 3x}{x^2}} = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{a}{1 - \frac{3}{x}} = a,$$

de modo que debe ser  $a = 2$ .

- b. Para que  $f$  tenga una asíntota oblicua  $y = 3x - 1$ , debe ser  $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{f(x)}{x} = 3$ . Como

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{\frac{ax^n}{x^2 + bx}}{x} = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{ax^n}{x^3 + bx^2},$$

y para que este límite exista, el grado del polinomio del numerador debe ser igual que el del denominador, es decir,  $n = 3$ , y en tal caso se tiene

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{\frac{ax^3}{x^2 + bx}}{x} = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{ax^3}{x^3 + bx^2} = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{\frac{ax^3}{x^3}}{\frac{x^3 + bx^2}{x^3}} = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{a}{1 + \frac{b}{x}} = a,$$

de manera que debe ser  $a = 3$ .

Por otro lado, también debe cumplirse que  $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} f(x) - 3x = -1$ . Como

$$\begin{aligned}\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{3x^3}{x^2 + bx} - 3x &= \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{3x^3 - 3x^3 - 3bx^2}{x^2 + bx} = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{\frac{-3bx^2}{x^2}}{\frac{x^2 + bx}{x^2}} \\ &= \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{-3b}{1 + \frac{b}{x}} = -3b,\end{aligned}$$

de donde se deduce que  $b = 1/3$ .

**Ejercicio 5.5.** La sucesión de Fibonacci se define como

$$a_1 = a_2 = 1 \quad \text{y} \quad a_{n+1} = a_n + a_{n-1}.$$

Demostrar que la sucesión  $\left(\frac{a_{n+1}}{a_n}\right)_{n=1}^{\infty}$  converge al número  $\phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$ .

### Solución

Sea  $x_n = \frac{a_{n+1}}{a_n}$ , donde  $(a_n)_{n=1}^{\infty}$  es la sucesión de Fibonacci. Entonces

$$x_{n+1} = \frac{a_{n+2}}{a_{n+1}} = \frac{a_{n+1} + a_n}{a_{n+1}} = 1 + \frac{a_n}{a_{n+1}} = 1 + \frac{1}{\frac{a_{n+1}}{a_n}} = 1 + \frac{1}{x_n},$$

que converge al número  $\phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$ , tal y como se vió en este [ejercicio](#).

## 6 2023-11-14 Examen de Análisis III

**Ejercicio 6.1.** Una fábrica de componentes electrónicos produce dos tipos de chips. Los ingresos, en cientos de euros, obtenidos por la venta de  $x$  miles de unidades del primer tipo e  $y$  miles de unidades del segundo tipo vienen dados por la función  $I(x, y) = -x^2 - \frac{1}{2}y^2 - \frac{1}{4}xy + 280x + 260y + 1000$ , mientras que los gastos de producción, vienen dados por la función  $C(x, y) = 100x + 120y + 6000$ . ¿Qué cantidad de chips de cada tipo debe producir la fábrica para maximizar el beneficio?

### Solución

Si  $I(x, y)$  es la función que da los ingresos y  $C(x, y)$  la que da los costes, la función que da los beneficios es

$$\begin{aligned}B(x, y) &= -x^2 - \frac{1}{2}y^2 - \frac{1}{4}xy + 280x + 260y + 1000 - (100x + 120y + 6000) \\&= -x^2 - \frac{1}{2}y^2 - \frac{1}{4}xy + 180x + 140y - 5000.\end{aligned}$$

Para calcular el máximo de esta función primero hay que obtener los puntos críticos, es decir, los puntos que anulan las derivadas parciales.

$$\begin{aligned}\frac{\partial B}{\partial x} &= -2x - \frac{1}{4}y + 180 = 0, \\ \frac{\partial B}{\partial y} &= -y - \frac{1}{4}x + 140 = 0.\end{aligned}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones se tiene que la única solución es el punto  $(\frac{2320}{31}, \frac{3760}{31})$ .

A continuación, calculamos el hessiano.

$$|\nabla^2 B(x, y)| = \begin{vmatrix} -2 & -\frac{1}{4} \\ -\frac{1}{4} & -1 \end{vmatrix} = \frac{31}{16},$$

que es positivo en cualquier punto, y en particular en el punto crítico  $(\frac{2320}{31}, \frac{3760}{31})$ , por lo en este punto hay un extremo relativo, y como  $\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = -2 < 0$ , se trata de un máximo relativo. En este punto, el beneficio es

$$B\left(\frac{2320}{31}, \frac{3760}{31}\right) = -\left(\frac{2320}{31}\right)^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{3760}{31}\right)^2 - \frac{1}{4}\frac{2320}{31}\frac{3760}{31} + 180\left(\frac{2320}{31}\right) + 140\left(\frac{3760}{31}\right) - 5000 \approx 10225.81 \cdot 10^2 \text{€}$$

Para ver que es el máximo absoluto, basta con ver que en los límites de la región del dominio de la función, en este caso  $\{(x, y), x \geq 0, y \geq 0\}$ , no hay ningún punto donde la función tome un valor mayor. En particular, para  $x = 0$  la función de beneficio es

$$f(y) = -\frac{1}{2}y^2 + 140y - 5000,$$

cuyos puntos críticos son

$$f'(y) = -y + 140 = 0 \Leftrightarrow y = 140.$$

que es un máximo relativo al ser  $f''(y) = -1 < 0$ , pero  $f(140) = 4800 < 10225.81$ . Del mismo modo se comprueba que para  $y = 0$  tampoco hay valores de  $x$  donde la función tome un valor mayor que en el máximo relativo.

**Ejercicio 6.2.** La presión (en Pascales) en la posición  $(x, y, z)$  de un espacio es  $p(x, y, z) = x^2 + y^2 - z^3$ , y la posición de un objeto en cada instante  $t > 0$  (en segundos) en ese mismo espacio está dada por la función vectorial

$$\begin{cases} x = \sqrt{t} \\ y = 1 \\ z = 1/t \end{cases}$$

- Calcular la ecuación de la recta tangente a la trayectoria en el punto  $(1, 1, 1)$ .
- Calcular la ecuación del plano normal a la trayectoria en el punto  $(1, 1, 1)$ .
- ¿Es la dirección de esta trayectoria al pasar por el punto  $(1, 1, 1)$  aquella en la que el crecimiento de la presión es máximo?
- ¿Cuál es la tasa de variación de la presión que soporta el objeto con respecto al tiempo en ese mismo instante?

### Solución

- Sea  $g(t) = (\sqrt{t}, 1, \frac{1}{t})$ . Resulta sencillo ver que la trayectoria de  $g$  pasa por el punto  $(1, 1, 1)$  cuando  $t = 1$ . Por tanto, se trata de calcular la ecuación de la recta tangente a la trayectoria de  $g$  para  $t = 1$ . La recta tangente la

trayectoria de  $g$  tiene la dirección que la derivada de la función vectorial, que vale  $g'(t) = \left(\frac{1}{2\sqrt{t}}, 0, -\frac{1}{t^2}\right)$ , y en particular, en  $t = 1$  vale  $g'(1) = \left(\frac{1}{2}, 0, -1\right)$ , por lo que la ecuación vectorial de la recta tangente resulta ser

$$g(1) + tg'(1) = (1, 1, 1) + t \left(\frac{1}{2}, 0, -1\right) = \left(1 + \frac{t}{2}, 1, 1 - t\right).$$

- b. El plano normal es perpendicular al vector de la derivada, por lo que el producto escalar de cualquier vector del plano normal y la derivada se anulará, es decir,

$$\begin{aligned} ((x, y, z) - g(1))g'(1) &= 0 \Leftrightarrow ((x, y, z) - (1, 1, 1)) \left(\frac{1}{2}, 0, -1\right) = 0 \\ &\Leftrightarrow \frac{x-1}{2} - (z-1) = 0 \Leftrightarrow \frac{x}{2} - z + \frac{1}{2} = 0. \end{aligned}$$

- c. Ya hemos visto que la dirección de la recta tangente a la trayectoria de  $g$  es la del vector  $\left(\frac{1}{2}, 0, -1\right)$ . Por otro lado, la dirección de máximo crecimiento de la  $f$  es la dirección del vector gradiente, que vale  $\nabla f(x, y, z) = (2x, 2y, -3z^2)$ , y en particular en el punto  $(1, 1, 1)$  vale  $\nabla f(1, 1, 1) = (2, 2, -3)$ . Para que la dirección de la recta tangente a la trayectoria de  $g$  sea la misma que la dirección de máximo crecimiento de  $p$ , ambos vectores deberían ser proporcionales, pero no lo son, por lo que ambas direcciones son distintas.
- d. La tasa de variación de la presión con respecto al tiempo es la derivada de  $p \circ g$ , que, aplicando la regla de la cadena, vale

$$\frac{dp}{dt} = \nabla(1, 1, 1)g'(1) = (2, 2, -3) \left(\frac{1}{2}, 0, -1\right) = 4 \text{ Pa/s.}$$

**Ejercicio 6.3.** El consumo de combustible de una avioneta (en l/m) depende de la altura a la que vuela  $h$  (en km) y su velocidad  $v$  (en cientos de km/h) según la función  $c(h, v) = \frac{v^2}{\ln(\sqrt{h+2})}$ .

- En el momento en que el avión tiene una altitud de 2 km y una velocidad de 250 km/h, ¿cómo cambiará el consumo si empezamos a cambiar la velocidad y la altura de manera velocidad disminuya la mitad de lo que aumenta la altura?
- En ese mismo instante, ¿cómo debería cambiar la altitud y la velocidad para que el consumo se reduzca lo más rápidamente posible?
- Si en ese instante, el avión empieza a acelerar a razón de 5 km/h por minuto y su altura empieza a disminuir a razón de 100 m por minuto. ¿Cuál será la tasa de variación del consumo de combustible con respecto al tiempo?

### Solución

- a. Para que la velocidad disminuya a razón de la mitad de lo que aumenta la altura, debemos cambiar la altura y la velocidad en la dirección del vector  $(1, -1/2)$ . La tasa de variación del consumo la da la derivada direccional de  $c$  en esta dirección, y para ello primero hay que calcular el vector gradiente. Las derivadas parciales de  $c$  son

$$\begin{aligned}\frac{\partial c}{\partial h} &= \frac{-2v^2}{\ln(h+2)^2} \frac{1}{h+2} = \frac{-2v^2}{\ln(h+2)^2(h+2)}, \\ \frac{\partial c}{\partial v} &= \frac{4v}{\ln(h+2)},\end{aligned}$$

por lo que el vector gradiente en el punto  $(2, 2.5)$  vale

$$\nabla(2, 2.5) = \left( \frac{-2 \cdot 2.5^2}{\ln(2+2)^2(2+2)}, \frac{4 \cdot 2.5}{\ln(2+2)} \right) = \left( \frac{-3.125}{\ln(4)^2}, \frac{10}{\ln(4)} \right).$$

Así pues, la derivada direccional de  $c$  en la dirección del vector  $\mathbf{u} = (1, -1/2)$  es

$$c'_{\mathbf{u}} = \nabla c(2, 2.5) \frac{\mathbf{u}}{|\mathbf{u}|} = \left( \frac{-3.125}{\ln(4)^2}, \frac{10}{\ln(4)} \right) \frac{(1, -1/2)}{\sqrt{1^2 + (-1/2)^2}} \approx -4.6804.$$

- b. Para que el consumo se reduzca lo más rápidamente posible, deberíamos cambiar la altitud y la velocidad en la dirección opuesta al gradiente, es decir, en la dirección del vector  $-\nabla c(2, 2.5) = \left( \frac{3.125}{\ln(4)^2}, \frac{-10}{\ln(4)} \right)$ .
- c. La tasa de variación del consumo con respecto al tiempo es

$$\frac{dc}{dt} = \nabla c(2, 2.5) \left( \frac{dh}{dt}, \frac{dv}{dt} \right) = \left( \frac{3.125}{\ln(4)^2}, \frac{-10}{\ln(4)} \right) (-0.1, 0.05) \approx 0.5233 \text{ l/min}^2.$$

**Ejercicio 6.4.** Un cable de longitud  $l$  tiene una sección circular de radio  $r$  y se enrolla sobre un cilindro de radio  $R$ . ¿Cuál es la longitud más corta que debe tener el cilindro para poder enrollar todo el cable sin que se solape?

Calcular la longitud para un cilindro de radio 10 cm y un cable de 10 m con una sección circular de radio 2 cm. ¿Cuántas vueltas completas daría el cable alrededor del cilindro?

 Solución

La trayectoria que describe el cable al enrollarlo sobre el cilindro es una espiral. Como el radio de la espiral es el radio del cilindro sobre el que se enrolla  $R$  y la distancia vertical que recorre la espiral en cada vuelta es el diámetro del cable  $2r$ , se tiene que la espiral está definida por la vectorial  $f(t) = (R \cos(t), R \sin(t), \frac{r}{\pi}t)$ . La distancia recorrida por esta espiral viene dada por la integral

$$\begin{aligned}s(t) &= \int_0^t |f'(x)| dx = \int_0^t \left| \left( -R \sin(x), R \cos(x), \frac{r}{\pi} \right) \right| dx \\&= \int_0^t \sqrt{(-R \sin(x))^2 + (R \cos(x))^2 + \left(\frac{r}{\pi}\right)^2} dx \\&= \int_0^t \sqrt{R^2(\sin(x)^2 + \cos(x)^2) + \frac{r^2}{\pi^2}} dx \\&= \int_0^t \sqrt{R^2 + \frac{r^2}{\pi^2}} dx = \left[ \frac{\sqrt{R^2 + r^2}}{\pi} x \right]_0^t \\&= \frac{\sqrt{R^2 + r^2}}{\pi} t\end{aligned}$$

Como la longitud del cable es  $l$  debe cumplirse que

$$\frac{\sqrt{R^2 + r^2}}{\pi} t = l \Leftrightarrow t = \frac{\pi l}{\sqrt{R^2 + r^2}}.$$

La altura del cilindro es la tercera componente de la función vectorial  $\frac{r}{\pi}t$ , de manera, que para el valor de  $t$  anterior se tiene que la mínima altura del cilindro debe ser

$$h = \frac{r}{\pi} \frac{\pi l}{\sqrt{R^2 + r^2}} = \frac{rl}{\sqrt{R^2 + r^2}}$$

En el caso de un cilindro de radio  $R = 10$  cm y un cable de 10 m y sección circular de radio 2 cm, sustituyendo en la expresión anterior se tiene

$$h = \frac{2 \cdot 1000}{\sqrt{10^2 \pi^2 + 2^2}} \approx 63.5334 \text{ cm.}$$

Finalmente, el número de vueltas que dará el cable alrededor del cilindro es

$$\frac{h}{2r} = \frac{63.5334}{4} \approx 15.8833,$$

es decir, 15 vueltas enteras.

## 7 2023-12-22 Examen de Análisis III

**Ejercicio 7.1.** La función de producción de una empresa de circuitos para teléfonos móviles está dada por  $f(k, l) = 50k^{3/4}l^{1/4}$ , donde  $k$  son las unidades de capital invertidas y  $l$  son las horas de mano de obra. Si el coste cada unidad de capital es 200€ y el de cada hora trabajada 50€, calcular la máxima producción si el coste total no puede exceder los 40000€.

### Solución

La función de coste es  $c(k, l) = 200k + 50l$  y debe cumplirse que  $c(k, l) \leq 40000$ , por lo que se trata de un problema de optimización con restricciones. Si aplicamos el método de los [multiplicadores de Lagrange](#), debe cumplirse

$$\begin{aligned}\nabla f(k, l) &= \lambda \nabla c(k, l) \\ c(k, l) &= 40000\end{aligned}$$

Si calculamos los gradientes de  $f$  y  $c$  se tiene

$$\begin{aligned}\nabla f(k, l) &= \left( 50 \frac{3}{4} k^{-1/4} l^{1/4}, 50 k^{3/4} \frac{1}{4} l^{-3/4} \right) \\ \nabla c(k, l) &= (200, 50)\end{aligned}$$

Por tanto, se debe cumplir

$$\begin{aligned}\left( 50 \frac{3}{4} k^{-1/4} l^{1/4}, 50 k^{3/4} \frac{1}{4} l^{-3/4} \right) &= \lambda (200, 50) \\ \Leftrightarrow \frac{50 \cdot 3l^{1/4}}{200 \cdot 4k^{1/4}} &= \frac{50k^{3/4}}{50 \cdot 4l^{3/4}} \\ \Leftrightarrow \frac{3l^{1/4}}{16k^{1/4}} &= \frac{k^{3/4}}{4l^{3/4}} \\ \Leftrightarrow l &= \frac{4}{3}k.\end{aligned}$$

Imponiendo ahora la restricción, se tiene

$$c\left(k, \frac{4}{3}k\right) = 200k + 50 \frac{4}{3}k = \frac{800}{3}k = 40000 \Leftrightarrow k = 150,$$

y sustituyendo en la expresión anterior de  $l$  se tiene  $l = \frac{4}{3}150 = 200$ .

Por tanto, la máxima producción se obtendrá para 200 unidades de capital y 150 horas de trabajo.

**Ejercicio 7.2.** Calcular los polinomios de Taylor de segundo grado de la función  $f(x, y) = \cos(x) \sen(y)$  en los puntos  $(0, \pi/2)$ ,  $(\pi/2, 0)$  y  $(\pi, \pi/2)$ . Justificar, en función del término cuadrático del polinomio si la función tiene un máximo relativo, un mínimo relativo o un punto de inflexión en cada uno de estos puntos.

### 💡 Solución

La fórmula del polinomio de Taylor de segundo grado de la función  $f$  en el punto  $(a, b)$  es

$$P_{f,(a,b)}^2(x, y) = f(a, b) + f'_x(a, b)(x - a) + f'_y(a, b)(y - b) \\ + \frac{1}{2} (f''_{xx}(x - a)^2 + 2f''_{xy}(a, b)(x - a)(y - b) + f''_{yy}(a, b)(y - b)^2),$$

por lo que necesitamos calcular hasta las derivadas parciales de segundo orden.

$$\begin{aligned} f(x, y) &= \cos(x) \sen(y) \\ f'_x(x, y) &= -\sen(x) \sen(y) \\ f'_y(x, y) &= \cos(x) \cos(y) \\ f''_{xx} &= -\cos(x) \sen(y) \\ f''_{xy} &= -\sen(x) \cos(y) \\ f''_{yx} &= -\sen(x) \cos(y) \\ f''_{yy} &= -\cos(x) \sen(y) \end{aligned}$$

A continuación calculamos el valor de estas derivadas en los puntos que nos dan

Función	$(0, \pi/2)$	$(\pi/2, 0)$	$(\pi, \pi/2)$
$f(a, b)$	1	0	-1
$f'_x(a, b)$	0	0	0
$f'_y(a, b)$	0	0	0
$f''_{xx}(a, b)$	-1	0	1
$f''_{xy}(a, b)$	0	-1	0
$f''_{xx}(a, b)$	-1	0	1

Así pues, sustituyendo la fórmula del polinomio de Taylor se tiene

$$\begin{aligned} P_{f,(0,\pi/2)}^2(x,y) &= 1 + \frac{1}{2}(-x^2 - (y - \pi/2)^2) = 1 - \frac{1}{2}(x^2 + (y - \pi/2)^2) \\ P_{f,(\pi/2,0)}^2(x,y) &= -(x - \pi/2)y \\ P_{f,(\pi,\pi/2)}^2(x,y) &= -1 + \frac{1}{2}((x - \pi) + (y - \pi/2)^2). \end{aligned}$$

Como se puede observar, el término de grado 1 de todos los polinomios se anula, ya que todos los puntos son puntos críticos de  $f$ . Como el primer término del polinomio es el valor de la función en el punto  $f(a,b)$ , podemos estudiar si se trata de extremos o puntos de silla observando el signo del término de grado dos del polinomio.

En el caso del punto  $(0, \pi/2)$ , el término cuadrático es  $-\frac{1}{2}(x^2 + (y - \pi/2)^2)$  que resulta ser negativo para cualquier valor de  $x$  e  $y$ , por lo que en cualquier punto de un entorno de este punto el valor de la función será menor que  $f(0, \pi/2)$ , y en consecuencia, en  $(0, \pi/2)$  hay un máximo relativo.

En el caso del punto  $(\pi/2, 0)$ , el término cuadrático es  $-(x - \pi/2)y$  que puede ser positivo o negativo dependiendo de los valores de  $x$  e  $y$ , por lo que habrá puntos en el entorno de  $(\pi/2, 0)$  donde la función tome valores mayores que  $f(0, \pi/2)$ , y puntos donde tome valores menores, y en consecuencia, en  $(0, \pi/2)$  hay un punto de silla.

Finalmente, en el caso del punto  $(\pi, \pi/2)$ , el término cuadrático es  $\frac{1}{2}((x - \pi) + (y - \pi/2)^2)$  que resulta ser positivo para cualquier valor de  $x$  e  $y$ , por lo que en cualquier punto de un entorno de este punto el valor de la función será mayor que  $f(\pi, \pi/2)$ , y en consecuencia, en  $(\pi, \pi/2)$  hay un mínimo relativo.

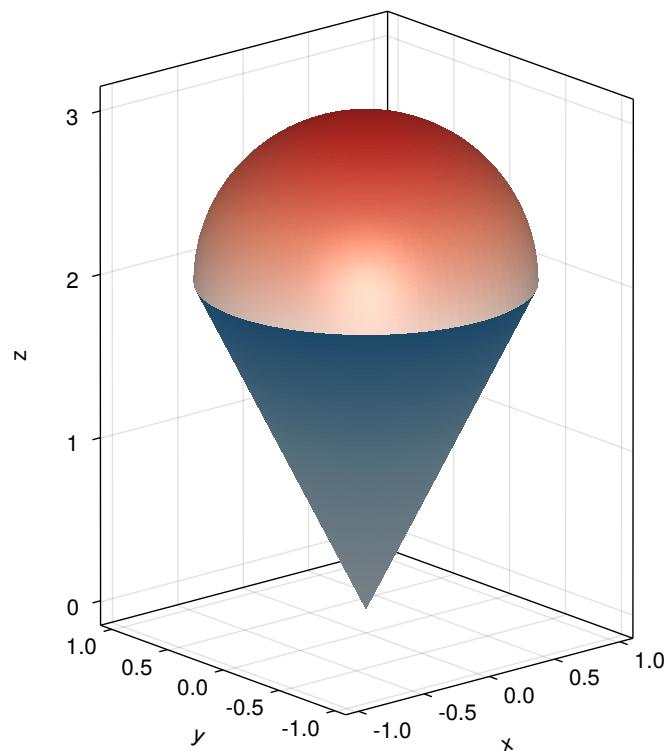
**Ejercicio 7.3.** Calcular la integral  $\int_0^4 \int_{\sqrt{y}}^2 \frac{1}{x^3 + 1} dx dy$ .

### Solución

Se trata de una integral racional pero resulta más sencilla si se invierte el orden de integración de las variables.

$$\begin{aligned} \int_0^4 \int_{\sqrt{y}}^2 \frac{1}{x^3 + 1} dx dy &= \int_0^2 \int_0^{x^2} \frac{1}{x^3 + 1} dy dx = \int_0^2 \frac{1}{x^3 + 1} [y]_0^{x^2} dx \\ &= \int_0^2 \frac{x^2}{x^3 + 1} dx = \frac{1}{3} [\ln |x^3 + 1|]_0^2 = \frac{1}{3} \ln(9). \end{aligned}$$

**Ejercicio 7.4.** Calcular el volumen de un helado formado por un cono de barquillo con ecuación  $4x^2 + 4y^2 - z^2 = 0$  sobre el que se coloca semiesfera de ecuación  $x^2 + y^2 + (z-2)^2 = 1$  como se muestra en la figura. ¿Qué cantidad de barquillo se necesita para construir el cono del helado?



#### 💡 Solución

Despejando  $z$  de ambas ecuaciones, se tiene que la función que define el cono es  $f(x, y) = \sqrt{4x^2 + 4y^2} = 2\sqrt{x^2 + y^2}$  y la que define la semiesfera superior es  $g(x, y) = 2 + \sqrt{1 - x^2 - y^2}$ , de manera que el volumen del helado será el volumen comprendido entre las superficies de  $g$  y  $f$ .

Para determinar la región de integración, resolvemos la ecuación que resulta de igualar las dos funciones.

$$f(x, y) = g(x, y) \Leftrightarrow 2\sqrt{x^2 + y^2} = 2 + \sqrt{1 - (x^2 + y^2)}$$

Haciendo el cambio  $u^2 = x^2 + y^2$  se tiene

$$\begin{aligned}
2\sqrt{u^2} &= 2 + \sqrt{1 - u^2} \Leftrightarrow 2u - 2 = \sqrt{1 - u^2} \\
\Leftrightarrow 4(u-1)^2 &= 1 - u^2 \\
\Leftrightarrow 4u^2 - 8u + 4 &= 1 - u^2 \\
\Leftrightarrow 5u^2 - 8u + 3 &= 0 \\
\Leftrightarrow u &= 3/5 \text{ o } u = 1.
\end{aligned}$$

Deshaciendo el cambio de variable, se tiene que la primera solución es  $x^2 + y^2 = 3/5$  y la segunda  $x^2 + y^2 = 1$ . Se observa que ambas soluciones definen una región circular centrada en el origen con radios  $\sqrt{3/5}$  y 1, respectivamente, ya que la esfera corta al cono en dos planos distintos, pero tomaremos la última solución que es la que se corresponde con la figura. Por tanto, la región de integración es  $R = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : -1 \leq x \leq 1, -\sqrt{1-x^2} \leq y \leq \sqrt{1-x^2}\}$ .

Por las características de las funciones y de la región de integración, resulta más sencillo hacer la integral en coordenadas polares, donde la región de integración es  $R = \{(r, \theta) \in \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R} : 0 \leq \theta \leq 2\pi, 0 \leq r \leq 1\}$ .

$$\begin{aligned}
\int_R g(x, y) - f(x, y) dA &= \int_0^{2\pi} \int_0^1 (g(r \cos(\theta), r \sin(\theta)) - f(r \cos(\theta), r \sin(\theta)))r dr d\theta \\
&= \int_0^{2\pi} \int_0^1 (2 + \sqrt{1 - (r \cos(\theta))^2 - (r \sin(\theta))^2} - 2\sqrt{(r \cos(\theta))^2 + (r \sin(\theta))^2})r dr d\theta \\
&= \int_0^{2\pi} \int_0^1 (2 + \sqrt{1 - r^2} - 2r)r dr d\theta \\
&= \int_0^{2\pi} \int_0^1 2r + r\sqrt{1 - r^2} - 2r^2 dr d\theta \\
&= \int_0^{2\pi} \left[ r^2 - \frac{(1 - r^2)^{3/2}}{3} - \frac{2r^3}{3} \right]_0^1 d\theta \\
&= \int_0^{2\pi} 1 - \frac{2}{3} + \frac{1}{3} d\theta \\
&= \int_0^{2\pi} \frac{2}{3} d\theta = \frac{2}{3}[\theta]_0^{2\pi} = \frac{4\pi}{3}.
\end{aligned}$$

Por otro lado, para averiguar la cantidad de barquillo que se necesita para construir el cono del helado, hay que calcular el área de la superficie del cono, que viene dada por la integral

$$\int_R \sqrt{f'_x(x, y)^2 + f'_y(x, y)^2 + 1} dA,$$

donde  $R$  es la misma región de integración de antes.

Así que necesitamos calcular las derivadas parciales de  $f$ .

$$f'_x(x, y) = \frac{2x}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

$$f'_y(x, y) = \frac{2y}{\sqrt{x^2 + y^2}}.$$

Por tanto, hay que calcular la siguiente integral.

$$\begin{aligned}
 \int_R \sqrt{f'_x(x, y)^2 + f'_y(x, y)^2 + 1} dA, &= \int_{-1}^1 \int_{-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{1-x^2}} \sqrt{\left(\frac{2x}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right)^2 + \left(\frac{2y}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right)^2 + 1} dy dx \\
 &= \int_{-1}^1 \int_{-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{1-x^2}} \sqrt{\frac{4x^2}{x^2 + y^2} + \frac{4y^2}{x^2 + y^2} + 1} dy dx \\
 &= \int_{-1}^1 \int_{-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{1-x^2}} \sqrt{5} dy dx \\
 &= \int_0^{2\pi} \int_0^1 \sqrt{5} r dr d\theta \\
 &= \int_0^{2\pi} \sqrt{5} \left[ \frac{r^2}{2} \right]_0^1 d\theta \\
 &= \int_0^{2\pi} \frac{\sqrt{5}}{2} d\theta = \frac{\sqrt{5}}{2} [\theta]_0^{2\pi} = \sqrt{5}\pi.
 \end{aligned} \tag{1}$$

(1) Cambio a coordenadas polares.

## 8 2024-01-11 Examen de Análisis I

**Ejercicio 8.1.** Dar ejemplos de conjuntos que cumplan lo siguiente y demostrarlo.

- Un conjunto que tenga exactamente dos puntos de acumulación.
- Un conjunto que no sea abierto ni cerrado.

### Solución

- a. Existen muchos conjuntos que cumplen lo que se pide, así que daremos uno sencillo. Si consideramos el conjunto  $A = \{\frac{1}{n} : n \in \mathbb{N}\}$ , podemos ver fácilmente que 0 es un punto de acumulación de  $A$ , ya que para cualquier  $\varepsilon > 0$ , por la propiedad arquimediana es posible encontrar un  $n \in \mathbb{N}$  tal que  $\frac{1}{n} < \varepsilon$ , y por tanto, el número  $\frac{1}{n}$  pertenece a  $A$  y también al entorno reducido  $(-\varepsilon, \varepsilon) \setminus \{0\}$ .

Veamos ahora que  $A$  no tiene más puntos de acumulación. Si  $x < 0$  tomando  $\varepsilon = |x|$ , el entorno reducido  $(x - \varepsilon, x + \varepsilon) \setminus \{x\}$  solo contendría puntos negativos por lo que no contendría ningún punto de  $A$ . Del mismo modo,  $x > 1$  tomando  $\varepsilon = |x - 1|$ , el entorno reducido  $(x - \varepsilon, x + \varepsilon) \setminus \{x\}$  solo contendría puntos mayores que 1 por lo que no contendría ningún punto de  $A$ , ya que el máximo de  $A$  es 1. Finalmente, si  $0 < x \leq 1$ , por la propiedad arquimediana, existe  $n \in \mathbb{N}$  tal que  $\frac{1}{n+1} < x < \frac{1}{n}$ . Tomando  $\varepsilon = \min(\{|x - \frac{1}{n+1}|, |x - \frac{1}{n}|\})$ , también se cumple que el entorno reducido  $(x - \varepsilon, x + \varepsilon) \setminus \{x\}$  no contiene puntos de  $A$ .

Del mismo modo, si consideramos el conjunto  $B = \{1 + \frac{1}{n} : n \in \mathbb{N}\}$ , usando el mismo razonamiento se puede probar que su único punto de acumulación es 1.

Así pues, el conjunto  $A \cup B$  solo tiene puntos de acumulación, 0 y 1.

- b. El caso más sencillo de un conjunto que no es ni abierto ni cerrado es un intervalo semiabierto, por ejemplo  $[0, 1)$ . Este conjunto no es abierto porque el punto 0 no es un punto interior suyo, y tampoco es cerrado porque su complementario  $\overline{[0, 1]} = (-\infty, 0] \cup [1, \infty]$  tampoco es abierto, ya que el punto 1 no es un punto interior suyo.

**Ejercicio 8.2.** El precio normalizado medio anual del metro cuadrado urbanizable en una ciudad sigue la sucesión

$$a_1 = 1, \quad a_{n+1} = \sqrt{2a_n + 3} \quad \forall n \in \mathbb{N}.$$

Estudiar si el precio converge a largo plazo y en tal caso calcular el valor límite.

### Solución

Si calculamos los primeros términos de la sucesión

$$a_1 = 1, \quad a_2 = \sqrt{2+3} \approx 2.2361, \quad a_3 \approx \sqrt{2 \cdot 2.2361 + 3} \approx 2.7335, \quad a_4 \approx \sqrt{2 \cdot 2.7335 + 3} \approx 2.9098, \dots,$$

se intuye que la sucesión es monótona creciente, pero vamos a probarlo por inducción. En primer lugar,  $a_1 < a_2$ . Supongamos ahora que  $a_{n-1} < a_n$ , entonces

$$a_{n-1} < a_n \Leftrightarrow 2a_{n-1} < 2a_n \Leftrightarrow 2a_{n-1} + 3 < 2a_n + 3 \Leftrightarrow \sqrt{2a_{n-1} + 3} < \sqrt{2a_n + 3} \Leftrightarrow a_n < a_{n+1},$$

y por tanto la sucesión es monótona creciente.

Veamos ahora, de nuevo por inducción, que está acotada superiormente por 3. En primer lugar,  $a_1 < 3$ . Supongamos ahora que  $a_n < 3$ , entonces

$$a_n < 3 \Leftrightarrow 2a_n < 2 \cdot 3 \Leftrightarrow 2a_n + 3 < 2 \cdot 3 + 3 \Leftrightarrow \sqrt{2a_n + 3} < \sqrt{2 \cdot 3 + 3} \Leftrightarrow a_{n+1} < 3,$$

por lo que la sucesión está acotada superiormente.

Aplicando el [teorema de la convergencia de sucesiones monótonas](#) se puede concluir que la sucesión tiene límite  $a$ . Para calcular el valor de  $a$  aprovecharemos la definición recurrente.

$$a = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} a_{n+1} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{2a_n + 3} = \sqrt{2 \lim_{n \rightarrow \infty} a_n + 3} = \sqrt{2a + 3},$$

y resolviendo la ecuación se tiene

$$a = \sqrt{2a + 3} \Leftrightarrow a^2 = 2a + 3 \Leftrightarrow a^2 - 2a + 3 = 0 \Leftrightarrow a = -1 \text{ o } a = 3.$$

Como la solución  $a = -1$  no puede ser al ser  $(a_n)_{n=1}^\infty$  una sucesión de términos positivos, se concluye que  $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 3$ , y por tanto el precio medio normalizado del metro cuadrado urbanizable converge a 3.

**Ejercicio 8.3.** Calcular las asíntotas de la función  $f(x) = \ln(\sqrt{x^4 e^x})$ . ¿Hacia dónde se aproxima pendiente de la recta tangente a  $f$  cuando  $x$  tiende a infinito?

## Solución

### Asíntotas verticales

Para determinar las asíntotas verticales primero debemos estudiar el dominio de la función. Como el dominio de la función logarítmica es  $\mathbb{R}^+$ ,  $f(x)$  está definida en los valores de  $x$  tales que  $\sqrt{x^4 e^x} > 0$ , y esto ocurre para cualquier  $x \neq 0$ , por tanto, el único punto donde puede haber asíntota vertical es en  $x = 0$ . Estudiamos los límites laterales de la función en este punto.

$$\lim_{x \rightarrow 0^-} f(x) = \lim_{x \rightarrow 0^-} \ln(\sqrt{x^4 e^x}) = -\infty.$$

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = \lim_{x \rightarrow 0^+} \ln(\sqrt{x^4 e^x}) = -\infty.$$

Como ambos límites no existen, no hay asíntota vertical en  $x = 0$ .

### Asíntotas horizontales

Para determinar las asíntotas horizontales, tenemos que calcular los límites en el infinito.

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow -\infty} \ln(\sqrt{x^4 e^x}) \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{1}{2} \ln(x^4 e^x) = -\infty \quad (1)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow \infty} \ln(\sqrt{x^4 e^x}) = \infty$$

(1)  $x^4 e^x$  es indeterminado cuando  $x \rightarrow -\infty$ , pero como la función exponencial crece más rápidamente que cualquier función potencial, se tiene que  $\lim_{x \rightarrow -\infty} x^4 e^x = 0$ . Y como ambos límites tampoco no existen, no hay asíntotas horizontales.

### Asíntotas oblicuas

Finalmente para ver si hay asíntotas oblicuas, tenemos que estudiar los siguientes límites en el infinito.

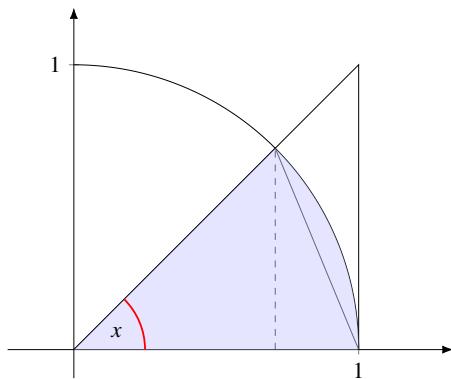
$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{f(x)}{x} &= \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{\ln(\sqrt{x^4 e^x})}{x} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{\ln(x^4 e^x)}{2x} \\ &= \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{\ln(x^4) + x}{2x} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{\ln(x^4)}{2x} + \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (1)$$
$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow \infty} f(x) - \frac{1}{2}x &= \lim_{x \rightarrow \infty} \ln(\sqrt{x^4 e^x}) - \frac{x}{2} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \ln(x^4 e^x) - \frac{x}{2} \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{2} (\ln(x^4) + x) - \frac{x}{2} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \ln(x^4) = \infty \end{aligned}$$

(1)  $\frac{\ln(x^4)}{2x}$  es indeterminado cuando  $x \rightarrow \infty$ , pero como la función logarítmica crece más despacio que cualquier función lineal, al final se tiene  $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\ln(x^4)}{2x} = 0$ .

Como el último límite no existe, tampoco hay asíntota oblicua en  $\infty$  y si calculamos los límites en  $-\infty$  se obtiene lo mismo, por lo que no hay asíntotas oblicuas.

A pesar de no haber asíntotas oblicuas, como  $\lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{f(x)}{x} = \frac{1}{2}$ , la pendiente de la recta tangente a  $f$  cuando  $x \rightarrow \infty$  tiende a  $\frac{1}{2}$ .

**Ejercicio 8.4.** Sabiendo que el área del arco de la circunferencia unidad está comprendido entre las áreas de los triángulos que se muestran en la siguiente figura cuando el ángulo  $x$  está en el primer cuadrante, demostrar que  $\sin(x)$  y  $x$  son infinitésimos equivalentes en 0.



#### Solución

Como se puede apreciar en la figura, el área del sector de la circunferencia unidad correspondiente a un ángulo  $x$  del primer cuadrante estará siempre contenido entre las áreas del triángulo pequeño y del grande.

Como el área del círculo unidad es  $\pi$ , es fácil ver que el área de este sector de círculo de ángulo  $x$  es  $x/2$ .

Por otro lado, para calcular el área del triángulo pequeño, se observa que la base es 1, y la altura es el cateto opuesto del triángulo rectángulo inscrito en el círculo correspondiente al ángulo  $x$ . Usando las razones trigonométricas de los triángulos rectángulos sabemos que  $\sin(x)$  es el cociente entre el cateto opuesto y la hipotenusa que vale 1, por lo que se concluye que la altura del triángulo pequeño es  $\sin(x)$ , y su área es  $\sin(x)/2$ .

Finalmente, para calcular el área del triángulo grande, volvemos a utilizar las razones trigonométricas de los triángulos rectángulos. Sabemos que  $\tan(x)$  es el cociente entre el cateto opuesto y el cateto contiguo, pero como el cateto contiguo vale 1, se tiene que la altura del triángulo es  $\tan(x)$ , por lo que su área es  $\tan(x)/2$ .

Así pues, se tienen las siguientes inequaciones,

$$\frac{\sin(x)}{2} \leq \frac{x}{2} \leq \frac{\tan(x)}{2} \Leftrightarrow \sin(x) \leq x \leq \tan(x)$$

Si ahora dividimos por  $\operatorname{sen}(x)$  en todos los lados de las inecuaciones, al ser  $\operatorname{sen}(x) > 0$  para cualquier ángulo  $x$  del primer cuadrante se tiene

$$\frac{\operatorname{sen}(x)}{\operatorname{sen}(x)} \leq \frac{x}{\operatorname{sen}(x)} \leq \frac{\operatorname{tg}(x)}{\operatorname{sen}(x)} \Leftrightarrow 1 \leq \frac{x}{\operatorname{sen}(x)} \leq \frac{1}{\cos(x)}.$$

Aplicando ahora el [teorema de la compresión de funciones](#), como

$$\lim_{x \rightarrow 0} 1 = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{\cos(x)} = 1,$$

podemos concluir que

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{x}{\operatorname{sen}(x)} = 1,$$

y esto prueba que,  $x$  y  $\operatorname{sen}(x)$  son infinitésimos equivalentes en 0.

**Ejercicio 8.5.** Un depósito para la recogida de agua de lluvia tiene forma de cono invertido con radio  $r = 5$  m y altura  $h = 5$  m. El depósito contiene agua hasta una altura de 2 m en el momento en que empieza a llover de manera que en el depósito entran  $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ , ¿cuál será la tasa de variación que experimentará el nivel de agua en el depósito en ese instante? Suponiendo que la intensidad de la lluvia no cambia, dar una aproximación lineal del tiempo necesario para que se llene el depósito.

### 💡 Solución

El volumen de un cono de radio  $r$  y altura  $h$  viene dado por la función de dos variables  $V(r, h) = \frac{1}{3}\pi r^2 h$ , pero en el caso de este cono en particular, como el radio es igual a la altura, podemos expresar el volumen en función de la altura como  $V(h) = \frac{1}{3}\pi r^3$ .

Cuando empieza a llover, el volumen de agua en el depósito empieza a cambiar a razón de  $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ , y por tanto, se tiene que  $\frac{dV}{dt} = 0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ . Para calcular la tasa de variación instantánea de la altura con respecto al tiempo, es decir  $\frac{dh}{dt}$ , podemos utilizar la regla de la cadena para calcular la derivada del volumen con respecto al tiempo, es decir,

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dh} \frac{dh}{dt},$$

de donde se deduce que

$$\frac{dh}{dt} = \frac{dV/dt}{dV/dh} = \frac{dV/dt}{\frac{1}{3}\pi 3h^2} = \frac{dV/dt}{\pi h^2}.$$

que en el instante en que comienza a llover, como  $h = 2$  m, vale

$$\frac{dh}{dt} = \frac{0.5}{\pi 2^2} \approx 0.0398 \text{ m/h.}$$

Para dar una aproximación lineal del tiempo que tardará en llenarse el depósito, podemos utilizar el diferencial del tiempo, se que según lo anterior será

$$\frac{dh}{dt} = 0.0398 \Leftrightarrow \frac{dt}{= 0.0398}.$$

Como el depósito ya tiene agua hasta una altura de 2 m, para que acabe de llenarse faltarían 3 m, de manera que sustituyendo  $dh = 3$  en la ecuación anterior se tiene

$$\frac{dt}{\approx 0.0398} \approx 75.3982 \text{ horas.}$$

**Ejercicio 8.6.** Calcular el polinomio de Maclaurin de tercer grado de la función  $f(x) = 2\sqrt[3]{1+x}$  y utilizarlo para aproximar  $\sqrt[3]{9}$  dando una cota del error cometido.

### Solución

La fórmula del polinomio de Maclaurin de orden 3 para la función  $f$  es

$$P_{3,f,0}(x) = f(0) + f'(0)x + \frac{f''(0)}{2!}x^2 + \frac{f'''(0)}{3!}x^3,$$

de modo que tenemos que calcular hasta la tercera derivada de  $f$  en el 0.

$$\begin{aligned} f(x) &= 2\sqrt[3]{1+x} = 2(1+x)^{1/3}, & f(0) &= 2(1+0)^{1/3} = 2, \\ f'(x) &= 2\frac{1}{3}(1+x)^{-2/3} = \frac{2}{3}(1+x)^{-2/3}, & f'(0) &= \frac{2}{3}(1+0)^{-2/3} = \frac{2}{3}, \\ f''(x) &= \frac{2}{3}\frac{-2}{3}(1+x)^{-5/3} = \frac{-4}{9}(1+x)^{-5/3}, & f''(0) &= \frac{-4}{9}(1+0)^{-5/3} = \frac{-4}{9}, \\ f'''(x) &= \frac{-4}{9}\frac{-5}{3}(1+x)^{-8/3} = \frac{20}{27}(1+x)^{-8/3}, & f'''(0) &= \frac{20}{27}(1+0)^{-8/3} = \frac{20}{27}, \end{aligned}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación del polinomio obtenemos el polinomio que nos piden

$$P(3, f, 0)(x) = 2 + \frac{2}{3}x + \frac{-4/9}{2}x^2 + \frac{20/27}{6}x^3 = 2 + \frac{2}{3}x - \frac{2}{9}x^2 + \frac{10}{81}x^3.$$

Para dar una aproximación del valor de  $\sqrt[3]{9}$ , primero averiguamos en qué punto la función toma este valor.

$$f(x) = 2\sqrt[3]{1+x} = \sqrt[3]{9} \Leftrightarrow (2\sqrt[3]{1+x})^3 = (\sqrt[3]{9})^3 \Leftrightarrow 2^3(1+x) = 9 \Leftrightarrow 8+8x = 9 \Leftrightarrow x = \frac{1}{8} = 0.125.$$

Calculando el polinomio anterior en este punto tenemos

$$\sqrt[3]{9} \approx P(3, f, 0)(0.125) = 2 + \frac{2}{3}0.125 - \frac{2}{9}0.125^2 + \frac{10}{81}0.125^3 = 2.080102258.$$

El error cometido en la aproximación anterior nos lo da el resto de Taylor, que en la forma Lagrange es

$$R_{3,f,0}(x) = \frac{f^{iv}(t)}{4!}x^4 = \frac{\frac{160}{81}(1+t)^{-11/3}}{24}x^4 = \frac{20}{243}\frac{1}{(1+t)^{11/3}}x^4 \quad t \in (0, x),$$

En el punto  $x = 0.125$  donde hemos calculado la aproximación, vale

$$R_{3,f,0}(0.125) = \frac{20}{243}\frac{1}{(1+t)^{11/3}}0.125^4 = 2.00938 \cdot 10^{-5}\frac{1}{(1+t)^{11/3}} \quad t \in (0, 0.125).$$

Para acotar el resto, basta con calcular el máximo de esta función en el intervalo  $(0, 0.125)$ . Puesto que la función  $1/(1+t)^{11/3}$  es decreciente en dicho intervalo, el máximo se alcanza en el extremo inferior del intervalo, es decir,  $t = 0$ . Así pues, tenemos la siguiente cota

$$|R_{3,f,0}(0.125)| = \left| 2.00938 \cdot 10^{-5} \frac{1}{(1+t)^{11/3}} \right| \leq \left| 2.00938 \cdot 10^{-5} \frac{1}{(1+0)^{11/3}} \right| = 2.00938 \cdot 10^{-5}.$$

**Ejercicio 8.7.** En Economía una función de utilidad expresa la satisfacción que un consumidor obtiene por la compra de un conjunto de bienes o servicios. La función  $U(x, y) = \sqrt[3]{\frac{x^2y}{2}}$ , expresa la utilidad de la compra de  $x$  litros de vino e  $y$  litros de cerveza para un bar. Si el precio del litro de vino es 4€ y el del litro de cerveza 2€, ¿cuántos litros de vino y cerveza debe comprar el bar para conseguir la máxima utilidad si dispone de un presupuesto de 1000€?

#### 💡 Solución

La función de utilidad es una función de dos variables, pero tenemos a restricción de que la empresa solo puede gastarse 1000€, por lo que debe cumplirse la ecuación  $4x + 2y = 1000$ . Despejando una de las variables en esta ecuación y sustituyendo en la fórmula de la función de utilidad, esta se convierte en una función de una sola variable. Por ejemplo, si despejamos el número de litros de cerveza tenemos  $y = \frac{1000-4x}{2} = 500 - 2x$ , y sustituyendo en la función de utilidad nos queda la función

$$U(x) = \sqrt[3]{\frac{x^2(500 - 2x)}{2}} = \sqrt[3]{250x^2 - x^3}.$$

Como se trata de calcular el valor de  $x$  que maximiza la función de utilidad, primero tenemos que obtener los puntos críticos y para ello necesitamos la derivada, que vale

$$U'(x) = \frac{500x - 3x^2}{3\sqrt[3]{(250x^2 - x^3)^2}},$$

y igualando a cero y resolviendo la ecuación se tiene

$$U'(x) = 0 \Leftrightarrow \frac{500x - 3x^2}{3\sqrt[3]{(250x^2 - x^3)^2}} = 0 \Leftrightarrow 500x - 3x^2 = 0 \Leftrightarrow x = 0 \text{ o } x = \frac{500}{3} \approx 166.6667.$$

El valor  $x = 0$  anula la función de utilidad así que no puede ser máximo, y para ver si la función tiene un máximo relativo en  $x = \frac{500}{3}$ , al ser la función de utilidad continua en el dominio del problema, podemos estudiar el signo de la derivada a la izquierda y a la derecha del punto crítico. Por ejemplo,

$$\begin{aligned} U'(166) &\approx 0.0063 > 0 \\ U'(167) &\approx -0.0032 < 0 \end{aligned}$$

Como el signo de la derivada a la izquierda del punto crítico es positivo, y a la derecha negativo, la función crece a la izquierda y decrece a la derecha del punto crítico, por lo que en  $x = \frac{500}{3}$  tenemos un máximo relativo. Como además no hay otro punto crítico a su derecha y la función es continua podemos concluir que es también máximo absoluto. Por tanto, el número de litros de vino que tienen que comprar la empresa es  $\frac{500}{3}$  y el de litros de cerveza se obtiene sustituyendo en la restricción, es decir  $y = 500 - 2\frac{500}{3} = \frac{500}{3}$ . Por tanto, debe comprar el mismo número de litros de vino y cerveza.

**Ejercicio 8.8.** Dar un ejemplo de una función que tenga una discontinuidad evitable en  $x = -2$ , una discontinuidad esencial en  $x = 0$  y una discontinuidad de salto en  $x = 1$  y demostrar que la función tiene esas discontinuidades.

#### 💡 Solución

Hay muchas funciones que cumplen lo que se pide, así que daremos una función a trozos bastante sencilla.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x+2}{x+2} & \text{si } x < -1 \\ \sqrt{x} & \text{si } -1 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{si } x > 1 \end{cases}$$

Veamos que  $f$  presenta las discontinuidades que se piden.

En  $x = -2$ , se tiene que  $f(x)$  no está definida ya que se anula el denominador, pero el límite existe ya que

$$\lim_{x \rightarrow -2} f(x) = \lim_{x \rightarrow -2} \frac{x+2}{x+2} = \lim_{x \rightarrow -2} 1 = 1,$$

por lo que la función tiene una discontinuidad evitable en  $x = -2$ .

En  $x = 0$  no se puede calcular el límite por la izquierda ya que la función  $\sqrt{x}$  no está definida en los negativos, por lo que presenta una discontinuidad esencial o de segunda especie.

Finalmente en  $x = 1$  los límites laterales valen

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 1^-} f(x) &= \lim_{x \rightarrow 1^-} \sqrt{x} = \sqrt{1} = 1, \\ \lim_{x \rightarrow 1^+} f(x) &= \lim_{x \rightarrow 1^+} 0 = 0, \end{aligned}$$

y como los límites son distintos la función presenta una discontinuidad de salto finito.