

**PAUTA DE CORRECCIÓN. EVALUACIÓN 1.  
 CÁLCULO III. 525211.**

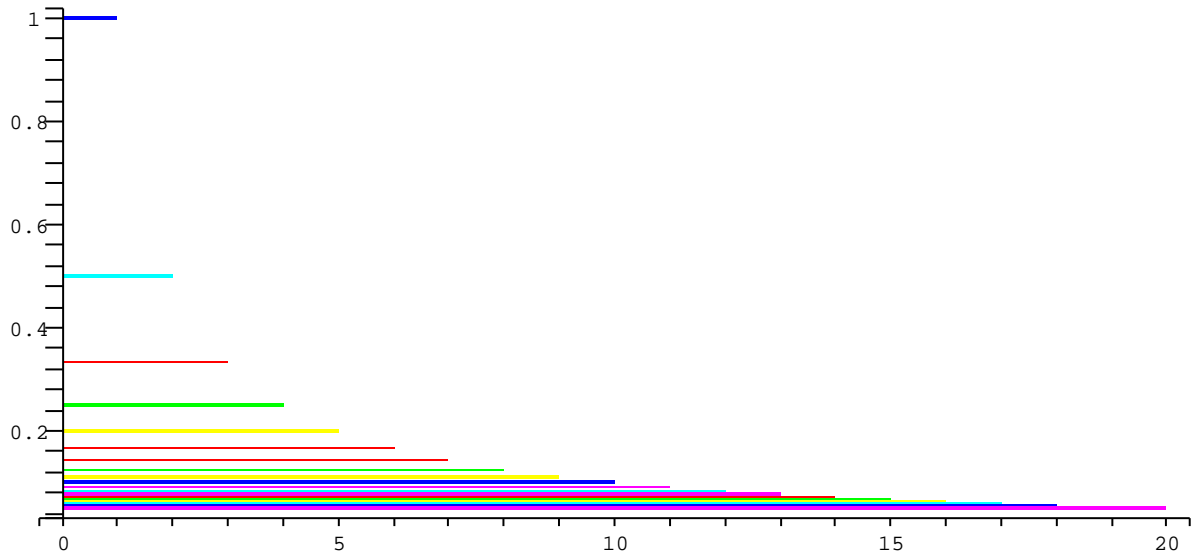
1. Sea  $C$  el conjunto definido por

$$C = \{(x, 1/n) \in \mathbb{R}^2 \mid x \in [0, n], n \in \mathbb{N}\}$$

- (0.5 pts.) Haga un bosquejo del conjunto  $C$  en  $\mathbb{R}^2$ .
- (1 pt.) Determine el interior, la frontera, y la cerradura de  $C$  en  $\mathbb{R}^2$ .
- (0.5 pts.) ¿La cerradura de  $C$  es compacta? Justifique su respuesta.

**Solución**

a)



b) i) **El interior de  $C$  es vacío**

$$\text{Int}(C) = \emptyset.$$

En efecto, sea  $(x_0, \frac{1}{n})$  un elemento de  $C$ , para algún  $n \in \mathbb{N}$ , y  $0 < x_0 < n$ . Para todo  $\varepsilon > 0$ , la bola  $B((x_0, \frac{1}{n}), \varepsilon)$  no está nunca contenida en  $C$ : efectivamente, si  $\delta = \frac{1}{2} \min(\varepsilon, \frac{1}{n} - \frac{1}{n+1})$ , entonces  $(x_0, \frac{1}{n} - \delta) \in B((x_0, \frac{1}{n}), \varepsilon) \setminus C$ . Luego ningún elemento de  $C$  es interior.

ii) **La frontera de  $C$ , está dada por**

$$\text{Fr}(C) = C \cup [0, +\infty) \times \{0\} = C \cup \{(x, 0) \in \mathbb{R}^2 \mid 0 \leq x < +\infty\}.$$

En efecto, sea  $(x_0, \frac{1}{n})$  un elemento de  $C$ , para algún  $n \in \mathbb{N}$ , y  $0 < x_0 < n$ . Para todo  $\varepsilon > 0$ , la bola perforada  $B^*((x_0, \frac{1}{n}), \varepsilon) = B((x_0, \frac{1}{n}), \varepsilon) \setminus \{(x_0, \frac{1}{n})\}$  contiene siempre un elemento de  $C$ :

$$(x_0 \pm \frac{\varepsilon}{2}, \frac{1}{2}) \in C \cap B^*((x_0, \frac{1}{n}), \varepsilon),$$

(donde  $\pm\varepsilon$  es igual a  $+\varepsilon$ , o  $-\varepsilon$ , según convenga), y otro que no está en  $C$  :

$$(x_0, \frac{1}{n} - \delta) \in B^*((x_0, \frac{1}{n}), \varepsilon) \setminus C.$$

Luego todo punto de  $C$  es punto frontera.

Por otro lado, sea  $(x_0, 0)$ , un elemento de  $[0, +\infty) \times \{0\}$ . Para todo  $\varepsilon > 0$ , la bola perforada  $B^*((x_0, 0), \varepsilon) = B((x_0, 0), \varepsilon) \setminus \{(x_0, 0)\}$  contiene siempre un elemento de  $C$  :

$$(x_0, \frac{1}{n}) \in C \cap B^*((x_0, 0), \varepsilon), \text{ donde } n = \max\left(x_0, \frac{1}{\varepsilon}\right) + 1,$$

y otro que no está en  $C$  :

$$(x_0, -\frac{\varepsilon}{2}) \in B^*((x_0, 0), \varepsilon) \setminus C.$$

Luego  $(x_0, 0)$  también es punto frontera para todo  $x_0 \geq 0$ .

Ningún otro punto es punto frontera, ya que fuera de este conjunto siempre se puede construir una bola de centro dicho punto y radio suficiente mente pequeño de modo que no contenga ningún punto de  $C$ .

- iii) Como el interior de  $C$  es vacío entonces **la cerradura de  $C$  es necesariamente igual a la frontera de  $C$** , es decir :

$$\overline{C} = C \cup [0, +\infty) \times \{0\}.$$

c) **La cerradura de  $C$  no es compacta**, ya que  $\overline{C}$  no es acotado (pues  $[0, +\infty) \times \{0\}$  no lo es).

2. Sea  $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ , definida por

$$f(x, y) = \begin{cases} \frac{xy(x^2 - y^2)}{x^2 + y^2}, & \text{si } (x, y) \neq (0, 0) \\ 0, & \text{si } (x, y) = (0, 0) \end{cases}$$

- a) (0.8 pts.) Asuma que  $f$  es continua en  $(0, 0)$  ; estudie la diferenciabilidad de  $f$  en  $(0, 0)$ .  
b) (0.8 pts.) Pruebe que  $\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}(0, 0) = -1$ , y que  $\frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x}(0, 0) = 1$ .  
c) (0.4 pts.) ¿  $f$  es de clase  $\mathcal{C}^2$  en  $(0, 0)$  ? Justifique su respuesta.

### Solución

- a) Diferenciabilidad de  $C$ . Calculemos  $\frac{\partial f}{\partial x}(0, 0)$ , y  $\frac{\partial f}{\partial y}(0, 0)$  :

$$\frac{\partial f}{\partial x}(0, 0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{0 - 0}{h} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial y}(0, 0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{0 - 0}{h} = 0.$$

Luego, de ser  $f$  diferenciable, necesariamente  $df(0, 0) \equiv 0$ . Sea  $h = (h_1, h_2) \in \mathbb{R}^2$ ,

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(h_1, h_2) - f(0, 0) - df(0, 0)h}{\|h\|} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\frac{h_1 h_2 (h_1^2 - h_2^2)}{h_1^2 + h_2^2} - 0 - 0}{\|h\|} = \lim_{h_1, h_2 \rightarrow 0} \frac{h_1 h_2 (h_1^2 - h_2^2)}{(h_1^2 + h_2^2)^{\frac{3}{2}}} = 0,$$

en efecto :

$$\left| \frac{h_1 h_2 (h_1^2 - h_2^2)}{(h_1^2 + h_2^2)^{\frac{3}{2}}} \right| \leq \left| \frac{h_1^3 h_2}{(h_1^2 + h_2^2)^{\frac{3}{2}}} \right| + \left| \frac{h_1 h_2^3}{(h_1^2 + h_2^2)^{\frac{3}{2}}} \right| \leq |h_1| + |h_2| \rightarrow 0,$$

cuando  $h_1, h_2 \rightarrow 0$ . **Luego  $f$  es diferenciable en  $(0, 0)$  y  $df(0, 0) \equiv 0$ .**

b) Si  $(x, y) \neq (0, 0)$ , entonces

$$\frac{\partial f}{\partial x}(x, y) = \frac{3x^2y - y^3}{x^2 + y^2} - \frac{2x^2y(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2} = \frac{(3x^2y - y^3)(x^2 + y^2) - 2x^2y(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2}.$$

Luego, por definición,

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}(0, 0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\frac{\partial f}{\partial x}(0, h) - \frac{\partial f}{\partial x}(0, 0)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\frac{-h^5}{h^4} - 0}{h} = -1.$$

Por otro lado,

$$\frac{\partial f}{\partial y}(x, y) = \frac{x^3 - 3xy^2}{x^2 + y^2} - \frac{2xy^2(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2} = \frac{(x^3 - 3xy^2)(x^2 + y^2) - 2xy^2(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2}.$$

Luego,

$$\frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x}(0, 0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\frac{\partial f}{\partial y}(h, 0) - \frac{\partial f}{\partial y}(0, 0)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\frac{h^5}{h^4} - 0}{h} = 1.$$

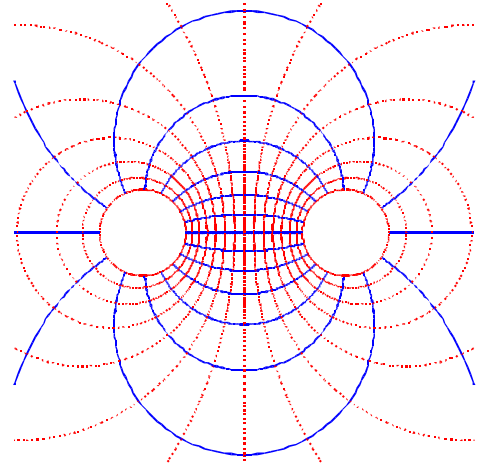
c) Un corolario del Teorema de Schwarz, dice que si  $f$  es de clase  $\mathcal{C}^2$ , entonces  $\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x}$ . Pero como no se verifica esa igualdad en  $(0, 0)$ , entonces  $f$  **no es de clase  $\mathcal{C}^2$  en  $(0, 0)$** .

3. Considere la siguiente función biyectiva llamada “cambio de variables en coordenadas bipolares” :

$$\begin{aligned} \varphi: \mathbf{R} \times [0, 2\pi) &\rightarrow \mathbf{R}^2 \\ (\rho, \theta) &\mapsto (x, y) = \left( \frac{\sinh \rho}{\cosh \rho - \cos \theta}, \frac{\sin \theta}{\cosh \rho - \cos \theta} \right). \end{aligned}$$

a) (1 pt.) Calcule la matriz jacobiana de  $\varphi$ , y de  $\varphi^{-1}$ .

b) (1 pt.) Sea  $f: \mathbf{R}^2 \rightarrow \mathbf{R}$  una función de clase  $\mathcal{C}^2$ . A partir de la matriz jacobiana de  $\varphi^{-1}$ , calcule el gradiente de  $f = f(x, y)$  en coordenadas bipolares, es decir calcule  $\nabla f = \left( \frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right)^t$ , en términos de  $\rho, \theta, \frac{\partial f}{\partial \rho}, \frac{\partial f}{\partial \theta}$ .



## Solución

a)

$$J\varphi(\rho, \theta) = \frac{1}{(\cosh \rho - \cos \theta)^2} \begin{bmatrix} -\cosh \rho \cos \theta + 1 & -\sinh \rho \sin \theta \\ -\sinh \rho \sin \theta & \cosh \rho \cos \theta - 1 \end{bmatrix}.$$

Por otro lado, es fácil ver que

$$\text{Det}(J\varphi(\rho, \theta)) = -\frac{1}{(\cosh \rho - \cos \theta)^2}$$

Con lo cuál

$$J\varphi^{-1}(\rho, \theta) = ([J\varphi(\rho, \theta)]^{-1})^t = \begin{bmatrix} -\cosh \rho \cos \theta + 1 & -\sinh \rho \sin \theta \\ -\sinh \rho \sin \theta & \cosh \rho \cos \theta - 1 \end{bmatrix}.$$

b) Por el teorema de la regla de la cadena, se tiene que

$$\nabla_{x,y} f = ([J\varphi(\rho, \theta)]^{-1})^t \nabla_{\rho,\theta} f$$

es decir,

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cosh \rho \cos \theta + 1 & -\sinh \rho \sin \theta \\ -\sinh \rho \sin \theta & \cosh \rho \cos \theta - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \rho} \\ \frac{\partial f}{\partial \theta} \end{bmatrix}$$

es decir,

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial x} = (-\cosh \rho \cos \theta + 1) \frac{\partial f}{\partial \rho} + (-\sinh \rho \sin \theta) \frac{\partial f}{\partial \theta} \\ \frac{\partial f}{\partial y} = (-\sinh \rho \sin \theta) \frac{\partial f}{\partial \rho} + (\cosh \rho \cos \theta - 1) \frac{\partial f}{\partial \theta} \end{cases}$$

MSC/msc

(23-Abril-2004)