

Cálculo Integral¹

Segundo Cuatrimestre 2025

Pau Frangi Mahiques, Pablo Pardo Cotos y Diego Rodríguez Cubero
*Ciencias Matemáticas e
Ingeniería Informática*

¹basado en la apuntes de Jesús Jaramillo

Contents

1	Superficies Paramétricas	2
1.1	Superficies como Conjuntos	5

1 Superficies Paramétricas

Definición 1.0.1 [Superficie Paramétrica]

Una parametrización de una superficie paramétrica S en \mathbb{R}^3 es una aplicación $\varphi : U \rightarrow \mathbb{R}^3$ de clase C^1 definida en un abierto conexo $U \subset \mathbb{R}^2$ tal que:

$$Im(\varphi) = \{\varphi(u, v) \in \mathbb{R}^3 : (u, v) \in U\} = S$$

Diremos que la parametrización φ es regular cuando la pareja de vectores $\left\{\frac{\partial \varphi}{\partial u}, \frac{\partial \varphi}{\partial v}\right\}$ es linealmente independiente en todo punto de U . Equivalentemente, cuando el vector normal asociado a φ es no nulo en todo punto de U :

$$\vec{N}_\varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial u} \times \frac{\partial \varphi}{\partial v} \neq \vec{0}$$

En este caso, el plano tangente a la superficie en el punto $\varphi(u_0, v_0)$ tiene como ecuaciones paramétricas:

$$\begin{cases} x = \varphi_1(u_0, v_0) + \lambda \frac{\partial \varphi_1}{\partial u}(u_0, v_0) + \mu \frac{\partial \varphi_1}{\partial v}(u_0, v_0) \\ y = \varphi_2(u_0, v_0) + \lambda \frac{\partial \varphi_2}{\partial u}(u_0, v_0) + \mu \frac{\partial \varphi_2}{\partial v}(u_0, v_0) \\ z = \varphi_3(u_0, v_0) + \lambda \frac{\partial \varphi_3}{\partial u}(u_0, v_0) + \mu \frac{\partial \varphi_3}{\partial v}(u_0, v_0) \end{cases} \quad \lambda, \mu \in \mathbb{R}$$

Ejemplo

Dada la superficie $z = x^2 + y^2$, podemos parametrizarla con $\varphi : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$ dada por $\varphi(x, y) = (x, y, x^2 + y^2)$. Calculemos el vector normal:

$$\vec{N}_\varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \times \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \begin{vmatrix} \vec{e}_1 & \vec{e}_2 & \vec{e}_3 \\ \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} & \frac{\partial \varphi_3}{\partial x} \\ \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} & \frac{\partial \varphi_3}{\partial y} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \vec{e}_1 & \vec{e}_2 & \vec{e}_3 \\ 1 & 0 & 2x \\ 0 & 1 & 2y \end{vmatrix} = \vec{e}_1 - 2x\vec{e}_3 + 2y\vec{e}_2 \neq (0, 0, 0)$$

Ejemplo

Superficies explícitas: Sean $U \subset \mathbb{R}^2$ abierto conexo y $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ de clase C^1 . Entonces la gráfica de f es una superficie regular con parametrización $\varphi : U \rightarrow \mathbb{R}^3$ dada por $\varphi(x, y) = (x, y, f(x, y))$. Veamos que $\vec{N}_\varphi \neq (0, 0, 0)$:

$$\vec{N}_\varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \times \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \begin{vmatrix} \vec{e}_1 & \vec{e}_2 & \vec{e}_3 \\ \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} & \frac{\partial \varphi_3}{\partial x} \\ \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} & \frac{\partial \varphi_3}{\partial y} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \vec{e}_1 & \vec{e}_2 & \vec{e}_3 \\ 1 & 0 & \frac{\partial f}{\partial x} \\ 0 & 1 & \frac{\partial f}{\partial y} \end{vmatrix} = \vec{e}_1 - \frac{\partial f}{\partial x} \vec{e}_3 + \frac{\partial f}{\partial y} \vec{e}_2 \neq (0, 0, 0)$$

$$Im(\varphi) = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : (x, y) \in U, z = f(x, y)\}$$

Ejemplo

Dado el cilindro de ecuaciones $x^2 + y^2 = 1$, $0 < z < 1$, busquemos una parametrización de la superficie. Tomando la siguiente parametrización:

$$\begin{cases} x = \cos(\theta) \\ y = \sin(\theta) \\ z = z \end{cases} \quad \theta \in \mathbb{R}, \quad z \in (0, 1)$$

entonces vemos que $\underbrace{x^2 + y^2}_1 = r^2 \implies r = 1$.

Por tanto, obtenemos que nuestra parametrización es:

$$\varphi : \mathbb{R} \times (0, 1) \rightarrow \mathbb{R}^3 \quad \varphi(\theta, z) = (\cos(\theta), \sin(\theta), z)$$

Calculemos el vector normal:

$$\vec{N}_\varphi = \begin{vmatrix} \vec{e}_1 & \vec{e}_2 & \vec{e}_3 \\ \frac{\partial \varphi_1}{\partial \theta} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial \theta} & \frac{\partial \varphi_3}{\partial \theta} \\ \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial z} & \frac{\partial \varphi_3}{\partial z} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \vec{e}_1 & \vec{e}_2 & \vec{e}_3 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = (\cos(\theta), \sin(\theta), 0) \neq (0, 0, 0)$$

Ejemplo

Tomando el cilindro $x^2 + y^2 = 1$, $0 < z < 1$ del ejemplo anterior, podemos parametrizarlo de otra forma.

Consideramos el siguiente conjunto:

$$U = \{(u, v) : 1 < \sqrt{u^2 + v^2} < 2, \quad 0 < v < 2\pi\}$$

entonces definimos nuestra parametrización $\varphi : U \rightarrow \mathbb{R}^3$ sobre este conjunto tal que

$$\varphi(u, v) = \left(\frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}}, \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}}, \sqrt{u^2 + v^2} - 1 \right)$$

Definición 1.0.2 [Superficies Equivalentes]

Diremos que dos superficies paramétricas $\varphi : U \rightarrow \mathbb{R}^3$ y $\psi : V \rightarrow \mathbb{R}^3$, definidas respectivamente sobre los conjuntos abiertos conexos $U, V \subset \mathbb{R}^2$, son equivalentes si existe una aplicación biyectiva $h : V \rightarrow U$ de clase C^1 (es decir, un difeomorfismo) tal que:

$$\psi = \varphi \circ h.$$

Observación 1.0.1

1. En este caso $\varphi(U) = \psi(V)$.
2. En la definición se pide que los conjuntos U y V sean conexos. Como $\forall (s, t) \in V$, $D_h(s, t) : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ es un isomorfismo lineal, sabemos que $\det(D_h(s, t)) \neq 0$. Por conexión, $\det(D_h(s, t))$ conserva el signo en todo V .

Definición 1.0.3 [Conservación de la Orientación]

1. Se dice que h conserva la orientación si $\det(D_h(s, t)) > 0$ para todo $(s, t) \in V$, es decir las funciones φ y ψ tienen la misma orientación.
2. Se dice que h cambia la orientación si $\det(D_h(s, t)) < 0$ para todo $(s, t) \in V$, es decir las funciones φ y ψ tienen orientaciones opuestas.

Lema 1.0.1

Sean $\varphi : U \rightarrow \mathbb{R}^3$ y $\psi : V \rightarrow \mathbb{R}^3$ dos parametrizaciones equivalentes de una superficie S . Entonces,

para todo $(s, t) \in V$, se cumple que:

$$\frac{\partial \psi}{\partial s} \times \frac{\partial \psi}{\partial t} = \det(D_h(s, t)) \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial u} \times \frac{\partial \varphi}{\partial v}(h(s, t))$$

Equivalentemente,

$$\vec{N}_\psi(s, t) = \det(D_h(s, t)) \cdot \vec{N}_\varphi(h(s, t))$$

Demostración. Aplicando la regla de la cadena a $\psi = \varphi \circ h$, obtenemos la siguiente relación entre las matrices jacobianas:

$$D_\psi(s, t) = D_\varphi(h(s, t)) \cdot D_h(s, t).$$

En términos de las derivadas parciales, esto se traduce en:

$$\frac{\partial \psi}{\partial s} = \frac{\partial \varphi}{\partial u} \frac{\partial h_1}{\partial s} + \frac{\partial \varphi}{\partial v} \frac{\partial h_2}{\partial s}, \quad \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial \varphi}{\partial u} \frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{\partial \varphi}{\partial v} \frac{\partial h_2}{\partial t},$$

donde $h(s, t) = (h_1(s, t), h_2(s, t))$.

Podemos escribir estas ecuaciones en forma matricial como:

$$\left(\frac{\partial \psi}{\partial s}, \frac{\partial \psi}{\partial t} \right) = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial u}, \frac{\partial \varphi}{\partial v} \right) \cdot D_h(s, t),$$

donde $D_h(s, t)$ es la matriz jacobiana de h :

$$D_h(s, t) = \begin{pmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial s} & \frac{\partial h_1}{\partial t} \\ \frac{\partial h_2}{\partial s} & \frac{\partial h_2}{\partial t} \end{pmatrix}.$$

Ahora, consideremos el producto vectorial de las derivadas parciales de ψ :

$$\frac{\partial \psi}{\partial s} \times \frac{\partial \psi}{\partial t}.$$

Utilizando las expresiones anteriores, tenemos:

$$\frac{\partial \psi}{\partial s} \times \frac{\partial \psi}{\partial t} = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial u} \frac{\partial h_1}{\partial s} + \frac{\partial \varphi}{\partial v} \frac{\partial h_2}{\partial s} \right) \times \left(\frac{\partial \varphi}{\partial u} \frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{\partial \varphi}{\partial v} \frac{\partial h_2}{\partial t} \right).$$

Expandiendo el producto vectorial y usando que $\frac{\partial \varphi}{\partial u} \times \frac{\partial \varphi}{\partial u} = 0$ y $\frac{\partial \varphi}{\partial v} \times \frac{\partial \varphi}{\partial v} = 0$, obtenemos:

$$\frac{\partial \psi}{\partial s} \times \frac{\partial \psi}{\partial t} = \left(\frac{\partial h_1}{\partial s} \frac{\partial h_2}{\partial t} - \frac{\partial h_1}{\partial t} \frac{\partial h_2}{\partial s} \right) \left(\frac{\partial \varphi}{\partial u} \times \frac{\partial \varphi}{\partial v} \right).$$

Notamos que el término entre paréntesis a la derecha es el determinante de la matriz jacobiana $D_h(s, t)$:

$$\det(D_h(s, t)) = \frac{\partial h_1}{\partial s} \frac{\partial h_2}{\partial t} - \frac{\partial h_1}{\partial t} \frac{\partial h_2}{\partial s}.$$

Por lo tanto, hemos demostrado que:

$$\frac{\partial \psi}{\partial s} \times \frac{\partial \psi}{\partial t} = \det(D_h(s, t)) \cdot \left(\frac{\partial \varphi}{\partial u} \times \frac{\partial \varphi}{\partial v} \right)(h(s, t)).$$

Equivalentemente, para los vectores normales unitarios:

$$\vec{N}_\psi(s, t) = \det(D_h(s, t)) \cdot \vec{N}_\varphi(h(s, t)),$$

donde \vec{N}_ψ y \vec{N}_φ son los vectores normales unitarios asociados a las parametrizaciones ψ y φ , respectivamente. \square

Definición 1.0.4 [Orientación de una Superficie]

Asociadas a las parametrizaciones φ y ψ obtenemos los vectores normales unitarios

$$\vec{n}_\varphi = \frac{\vec{N}_\varphi}{\|\vec{N}_\varphi\|} \quad y \quad \vec{n}_\psi = \frac{\vec{N}_\psi}{\|\vec{N}_\psi\|}$$

Entonces diremos que φ y ψ tienen la misma orientación si:

$$\vec{n}_\psi(s, t) = \vec{n}_\varphi(h(s, t)) \quad o \quad \vec{n}_\psi(s, t) = -\vec{n}_\varphi(h(s, t))$$

1.1 Superficies como Conjuntos**Definición 1.1.1** [Superficie Simple Regular]

Diremos que $S \subset \mathbb{R}^3$ es una superficie simple regular si $S = \varphi(\overline{D})$ donde $\overline{D} = \text{Int}(C)$ siendo $C \subset \mathbb{R}^2$ una curva de Jordan regular a trozos, y $\varphi : U \rightarrow \mathbb{R}^3$ una parametrización de clase C^1 inyectiva y regular en \overline{D} .

En este caso, se dice que la curva $\varphi(C)$ es el borde de S . Así, $\gamma = \varphi(C)$ es una curva cerrada y regular a trozos en \mathbb{R}^3 .

Definición 1.1.2 [Superficie Casi-Simple Regular]

Diremos que $S \subset \mathbb{R}^3$ es una superficie casi-simple regular si $S = \varphi(\overline{D})$ donde $\overline{D} = \text{Int}(C)$ siendo $C \subset \mathbb{R}^2$ una curva de Jordan regular a trozos, y $\varphi : U \rightarrow \mathbb{R}^3$ una parametrización de clase C^1 inyectiva y regular en D .

Definición 1.1.3

Dada una superficie S en \mathbb{R}^3 simple regular o casi-simple regular, y una parametrización $\varphi : U \rightarrow \mathbb{R}^3$ de clase C^1 de S , definimos:

1. El área de la superficie S como:

$$a(S) = \int_D \left\| \frac{\partial \varphi}{\partial u} \times \frac{\partial \varphi}{\partial v} \right\| du dv$$

2. Si $f : S \rightarrow \mathbb{R}$ es una función continua, entonces la integral de superficie de f sobre S es:

$$\int_S f dS = \int_D f(\varphi(u, v)) \left\| \frac{\partial \varphi}{\partial u} \times \frac{\partial \varphi}{\partial v} \right\| du dv$$

Ejemplo

Consideramos la superficie S de \mathbb{R}^3 resultante de acotar un cono por dos planos paralelos al plano XY , y dada por las ecuaciones:

$$S = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : x^2 + y^2 = z^2, 1 < z < 2\}$$

Calculemos el área de la superficie S :

$$\begin{cases} x = r \cos(\theta) \\ y = r \sin(\theta) \\ z = r \end{cases} \quad r^2 = x^2 + y^2 = z^2 \implies r = z \quad \varphi(\theta, z) = \begin{cases} x = z \cos(\theta) \\ y = z \sin(\theta) \\ z = z \end{cases}$$

$$\overline{D} = [0, 2\pi] \times [1, 2] \quad S = \varphi(D)$$

$$\vec{N}_\varphi = \begin{vmatrix} \vec{e}_1 & \vec{e}_2 & \vec{e}_3 \\ -z \sin(\theta) & z \cos(\theta) & 0 \\ \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \end{vmatrix} = (z \cos(\theta), z \sin(\theta), -z)$$

$$\|\vec{N}_\varphi\|^2 = z^2 \cos^2(\theta) + z^2 \sin^2(\theta) + (-z)^2 = 2z^2 \implies \|\vec{N}_\varphi\| = z\sqrt{2} \neq 0 \quad \forall (0, z) \in D$$

Entonces φ es inyectiva y regular en D (aunque no en \overline{D}), luego S es una superficie casi-simple regular.

Por último, el área de la superficie S es:

$$\begin{aligned} a(S) &= \int_D \|\vec{N}_\varphi\| du dv = \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} \int_{z=1}^{z=2} z\sqrt{2} dz d\theta = \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} \left[\frac{z^2}{2} \sqrt{2} \right]_1^2 d\theta \\ &= \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} \left(\frac{4}{2} \sqrt{2} - \frac{1}{2} \sqrt{2} \right) d\theta = \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} \frac{3}{2} \sqrt{2} d\theta = \frac{3}{2} \sqrt{2} \cdot 2\pi = 3\pi\sqrt{2} \end{aligned}$$

Ejemplo

Dada la función $f(x, y, z) = x^2 + y^2 + z^2$, calculemos la integral de superficie de f sobre la superficie S dada por la sección de cono $x^2 + y^2 = z^2$, $1 < z < 2$ del ejemplo anterior.

Entonces, la integral de superficie de f sobre S es:

$$\begin{aligned} \int_S f dS &= \int_D f(\varphi(\theta, z)) \|\vec{N}_\varphi\| d\theta dz = \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} \int_{z=1}^{z=2} 2z^2 \cdot z\sqrt{2} dz d\theta = \int_0^{2\pi} \frac{2\sqrt{2}}{4} [z^4]_1^2 d\theta \\ &= \int_0^{2\pi} \frac{2\sqrt{2}}{4} (16 - 1) d\theta = \int_0^{2\pi} \frac{30\sqrt{2}}{4} d\theta = \int_0^{2\pi} \frac{15\sqrt{2}}{2} d\theta = \frac{15\sqrt{2}}{2} \cdot (2\pi) = 15\pi\sqrt{2} \end{aligned}$$

Observemos que $\int_S f dA = \int_S f dS$.

Ejemplo

Área de una esfera en \mathbb{R}^3 :

$$S_R = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : x^2 + y^2 + z^2 = R^2\} \quad R > 0$$

Sea:

$$\varphi \begin{cases} x = R \cos(\theta) \sin(\psi) \\ y = R \sin(\theta) \sin(\psi) \\ z = R \cos(\psi) \end{cases} \quad \begin{pmatrix} 0 \leq \theta \leq 2\pi \\ 0 \leq \psi \leq \pi \end{pmatrix} \equiv \overline{D}$$

Ahora calculemos \vec{N}_φ :

$$\begin{aligned} \vec{N}_\varphi &= \begin{vmatrix} \vec{e}_1 & \vec{e}_2 & \vec{e}_3 \\ -R \sin(\theta) \sin(\psi) & R \cos(\theta) \sin(\psi) & 0 \\ R \cos(\theta) \cos(\psi) & R \sin(\theta) \cos(\psi) & -R \sin(\psi) \end{vmatrix} = \\ &= (-R^2 \cos(\theta) \sin^2(\psi), -R^2 \sin(\theta) \sin^2(\psi), -R^2 \cos(\psi) \sin(\psi)) \end{aligned}$$

Ahora deducimos:

$$\|\vec{N}_\varphi\|^2 = R^4 \sin^4(\psi) + R^4 \cos^2(\psi) \sin^2(\psi) = R^4 \sin^2(\psi) \implies \|\vec{N}_\varphi\| = R^2 \sin(\psi)$$

Finalmente calculemos el area:

$$\text{area}(S_R) = \int_D \|\vec{N}_\varphi\| = \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} \int_{\psi=0}^{\psi=\pi} R^2 \sin(\psi) R^2 \sin(\psi) d\psi d\theta = 2\pi R^2 [-\cos(\psi)]_{\psi=0}^{\psi=\pi} = 4\pi R^2$$

Definición 1.1.4 [Superficies Regulares a trozos (suma de superficies)]

Sean $S_1, S_2 \subset \mathbb{R}^3$ dos superficies simples regulares. Se dice que S es la suma de S_1 y S_2 y denotamos $S = S_1 + S_2$ cuando:

1. $S = S_1 \cup S_2$.
2. $S_1 \cap S_2 = \partial S_1 \cap \partial S_2$.

En este caso se define el borde de S como

$$\partial S = \overline{(\partial S_1 \cup \partial S_2)} \setminus \overline{(\partial S_1 \cap \partial S_2)}$$

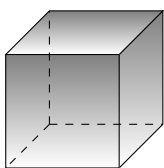
Si $\partial S = \emptyset$ se dice que S no tiene borde y es cerrada.

Analogamente podemos definir la suma de superficies $S_1 + S_2 + \dots + S_k$ siendo cada S_i $i \in [1, k]$ una superficie simple regular.

Ejemplo

Superficie del cubo

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6, \quad \partial S = \emptyset$$



Ejemplo

