



Universidad de Granada

DOBLE GRADO EN INGENIERÍA INFORMÁTICA Y
MATEMÁTICAS

ANÁLISIS FUNCIONAL

Autor:
Jesús Muñoz Velasco

Curso 2025-2026

Índice general

| | |
|--|----|
| 0.1. Espacios de Hilbert | 8 |
| 0.2. Espacios Duales | 12 |
| 0.3. Espacio Dual de un Espacio de Hilbert | 12 |

Repaso

Definición 0.1 (Espacio normado). E un espacio vectorial y $\|\cdot\| : E \rightarrow \mathbb{R}$ una función que verifica:

1. $\|x\| \geq 0 \quad \forall x \in E$
2. $\|x\| = 0 \iff x = 0$
3. $\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$
4. $\|\lambda x\| = |\lambda| \|x\| \quad \forall x, y \in E, \lambda \in \mathbb{R}$

A esta función la llamaremos **norma** y diremos que E es un **espacio normado**. Podemos definir además una función $d : E \times E \rightarrow \mathbb{R}$ dada por $d(x, y) = \|x - y\| \quad \forall x, y \in E$ a la que llamaremos **distancia**.

Decimos que un espacio E es **completo** si toda sucesión de Cauchy es convergente. Si E es un espacio normado completo, entonces $(E, \|\cdot\|)$ es un **espacio de Banach**.

Definición 0.2 (Espacio prehilbertiano). Sea H es un espacio vectorial, un **producto escalar** es una función $(\cdot, \cdot) : H \times H \rightarrow \mathbb{R}$ tal que verifica las siguientes propiedades:

1. **Bilineal:** para todo $x, y, z \in H, \alpha, \beta \in \mathbb{R}$ se verifica que

$$\begin{aligned}(\alpha x + \beta y, z) &= \alpha(x, z) + \beta(y, z) \\(x, \alpha y + \beta z) &= \alpha(x, y) + \beta(x, z)\end{aligned}$$

2. **Simétrica:** $(x, y) = (y, x) \quad \forall x, y \in H$
3. **Positiva:** $(x, x) \geq 0 \quad \forall x \in H$
4. **Definida positiva:** $(x, x) > 0 \quad \forall x \in H \setminus \{0\}$

Las dos últimas propiedades se pueden resumir en $(x, x) = 0 \iff x = 0$.

Diremos que $(H, (\cdot, \cdot))$ es un **espacio prehilbertiano**.

Todo espacio prehilbertiano es en particular un espacio normado, ya que podemos definir $\|x\| = \sqrt{(x, x)}$ que es claramente una norma.

Si $\|\cdot\|$ es completa, diremos que $(H, (\cdot, \cdot))$ es un **espacio de Hilbert**.

Ejemplo. Los siguientes espacios son de Banach:

1. $(\mathbb{R}, |\cdot|)$.
2. $(\mathbb{R}^N, |\cdot|)$, donde $|x| = |(x_1, x_2, \dots, x_N)| = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}$. Además es de Hilbert ya que $(x, y) = \sum_{i=1}^N x_i y_i$ es un producto escalar.
3. Dado¹ $A \subset \mathbb{R}^N$ tomamos $\mathcal{C}_b(A) = \{f : A \rightarrow \mathbb{R} : f \text{ es continua y acotada en } A\}$. Podemos definir una norma en este espacio como

$$\|f\|_{\mathcal{C}_b(A)} = \sup\{|f(x)| : x \in A\}$$

4. Tomamos $K \subset \mathbb{R}^N$ compacto. Consideramos el conjunto de las funciones continuas en K denotado por $\mathcal{C}(K)$ y el espacio $(K, (\cdot, \cdot))$, donde

$$(f, g) = \int_K f(x)g(x)dx$$

es un producto escalar que hace a este un espacio prehilbertiano. Tendríamos

$$\|f\| = \left(\int_K f(x)^2 dx \right)^{1/2}$$

Ejemplo (El espacio del punto 4 No es de Hilbert). Veámoslo con un contraejemplo. Tomamos $K = [0, 1] \subset \mathbb{R}$ y podemos definir $\forall n \in \mathbb{N}$ la función $f_n : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^+$ tal que f_n^2 viene dada por la siguiente gráfica:



De esta forma tenemos que

$$\|f_n\|^2 = \int_0^1 f_n^2(x) dx = \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{2n} \Rightarrow \|f_n\| = \frac{1}{\sqrt{2n}} \rightarrow 0$$

y vemos que

$$\begin{cases} \{f_n(x)\} \rightarrow 0 & \forall x \in (0, 1] \\ \{f_n(0) = 1\} \rightarrow 1 \end{cases}$$

Con esto tenemos que la sucesión $\{f_n\} \rightarrow 0$ en $(\mathcal{L}([0, 1]), (\cdot, \cdot))$ (ya que la norma converge a 0).

PARA MAÑANA RESOLVER QUÉ ES LO QUE NO ESTÁ CLARO (la contradicción para ser espacio de Hilbert).

¹la b de \mathcal{C}_b viene de *bounded* (acotado en inglés)

Ejemplo. Consideramos $\emptyset \neq \Omega \subset \mathbb{R}^N$ medible, entonces podemos definir

$$L^2(\Omega) = \mathcal{L}^2(\Omega) / \sim = \{f : \Omega \rightarrow \mathbb{R} \text{ medible} : \int_{\Omega} f(x)^2 dx < \infty\}$$

$L^2(\Omega)$ con la norma definida anteriormente (en el punto 4) es un espacio de Hilbert (teorema de Fischer)

Ejemplo. Sea $1 \leq p < \infty$. Consideramos el conjunto

$$L^p(\Omega) = \left\{ f : \Omega \rightarrow \mathbb{R} \text{ medibles} : \int_{\Omega} |f|^p dx < \infty \right\}$$

Entonces tenemos que con la norma definida como

$$\|f\|_{L^p(\Omega)} = \left(\int_{\Omega} |f|^p dx \right)^{1/p}$$

es un espacio de Banach. Recordemos para este resultado la desigualdad de Hölder y Minkowski. Definimos para ello el conjugado de p de la siguiente forma²:

$$p' = \begin{cases} \frac{p}{p-1} & \text{si } 1 < p < \infty \\ \infty & \text{si } p = 1 \end{cases} \Rightarrow \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = 1 \quad \forall p \in [1, \infty)$$

Con esto tendremos que

$$\left. \begin{array}{l} f \in L^p(\Omega) \\ g \in L^{p'}(\Omega) \end{array} \right\} \Rightarrow fg \in L^1(\Omega)$$

Además, se tiene que

$$\int |f(x)g(x)| dx \leq \left(\int |f|^p dx \right)^{1/p} \left(\int |g|^{p'} dx \right)^{1/p'} = \|f\|_{L^p} \|g\|_{L^{p'}}$$

Ejemplo.

1. $(\mathbb{R}^N, \|\cdot\|_p)$ con $\|x\|_p = (\sum_{i=1}^N |x_i|^p)^{1/p}$ ($x, y = \sum_{i=1}^N x_i y_i$).
2. $(\mathbb{R}^N, \|\cdot\|_{\infty})$ con $\|x\|_{\infty} = \max\{|x_i| : i = 1, \dots, N\}$
3. Sea $p = \infty$. Tenemos

$$L^{\infty} = \{f : \Omega \rightarrow \mathbb{R} \text{ medible} : \sup\{|f(x)| : x \in \Omega\} < \infty\}$$

A este supremo lo llamaremos **supremo esencial**, que se define de la siguiente forma³:

$$\sup_{\Omega} |f| = \inf\{M \geq 0 : |f(x)| \leq M \text{ a.e. } x \in \Omega\}$$

²donde asumimos que $1/\infty = 0$

³a.e. viene de *almost everywhere* (casi por doquier en inglés)

En algunos libros se denota por *ess sup*.

Podremos reescribir lo anterior como

$$L^\infty = \{f : \Omega \rightarrow \mathbb{R} \text{ medible} : \sup_{\Omega} |f| < \infty\}$$

Entonces el espacio $(L^\infty, \|\cdot\|_\infty)$ con $\|f\|_\infty = \sup_{\Omega} |f|$ es un espacio de Banach.

La desigualdad de Hölder con $p = \infty$, $p' = 1$ nos dice que para $f \in L^\infty(\Omega)$, $g \in L^1(\Omega)$ entonces $fg \in L^1(\Omega)$ y $\|fg\|_{L^1} \leq \|f\|_{L^\infty} \|g\|_{L^1}$ es una norma en H .

Ejemplo. Consideramos $1 \leq p < \infty$ y definimos el conjunto de sucesiones.

$$\mathcal{L}^p = \{x : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R} : \sum_{n=1}^{\infty} |x(n)|^p < \infty\}$$

Si definimos ahora

$$\|x\|_{\mathcal{L}^p} = \left(\sum_{n=1}^{\infty} |x(n)|^p \right)^{1/p}$$

entonces $(\mathcal{L}^p, \|\cdot\|_p)$ es un espacio de Banach. Para verlo podemos tomar $x \in \mathcal{L}^p$, $y \in \mathcal{L}^{p'}$ y tenemos que

$$xy \in \mathcal{L}^1 \quad y \quad \|xy\|_{\mathcal{L}^1} \leq \|x\|_{\mathcal{L}^p} \|y\|_{\mathcal{L}^{p'}}$$

de la que se deduce la desigualdad de Mikowsky.

Para $p = 2$ tenemos que $(\mathcal{L}^2, \|\cdot\|_2)$ es un espacio de Hilbert. Para $p = \infty$ podemos definir $\mathcal{L}^\infty = \{x : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R} : x \text{ sucesión acotada}\}$ y con $\|x\|_\infty = \sup\{|x(n)| : n \in \mathbb{N}\}$ es un espacio de Banach.

Ejemplo. Podemos considerar los siguientes subespacios que seguirán siendo espacios de Banach:

1. Tomamos $C = \{x \in \mathcal{L}^\infty : x \text{ es convergente}\}$ y es un subespacio de \mathcal{L}^∞ .
2. Podemos tomar otro subespacio de este, $C_0 = \{x \in C : x \text{ es convergente a } 0\}$ que de nuevo es un subespacio de \mathcal{L}^∞ .

0.1. Espacios de Hilbert

Recordemos que un espacio de Hilbert es un par $(H, (\cdot, \cdot))$ donde H es un espacio vectorial y (\cdot, \cdot) es una función bilineal simétrica y definida positiva.

Proposición 0.1. Si H es prehilbertiano entonces se tiene:

1. Se cumple la Desigualdad de Cauchy-Schwarz, es decir

$$|(u, v)| \leq \|u\| \cdot \|v\|, \quad \forall u, v \in H$$

2. Se verifica la desigualdad del paralelogramo

$$\left\| \frac{u+v}{2} \right\|^2 + \left\| \frac{u-v}{2} \right\|^2 = \frac{1}{2} (\|u\|^2 + \|v\|^2), \quad \forall u, v \in H$$

Teorema 0.2 (Teorema de la Proyección). Supongamos que H es un espacio Hilbertiano y $\emptyset \neq K \subset H$ un conjunto convexo y cerrado, entonces $\forall f \in H \exists u \in K$ tal que $\|f - u\| = \text{dist}(f, K)$. Además, dicho u está caracterizado por:

$$\begin{cases} u \in K \\ (f - u, v - u) \leq 0 \quad \forall v \in K \end{cases}$$

Notaremos a dicho u por $P_K f$ y **diremos que es la proyección de f sobre K**

Demostración. En primer lugar tendremos que ver que $d(f, K) = \inf\{\|f - v\| : v \in K\}$ existe y se alcanza. Al ser un ínfimo de cantidades positivas sabemos que existe y nos quedará ver que se alcanza.

Por definición de ínfimo tenemos que

$$\exists \{v_n\} \subset K \text{ tal que } \|f - v_n\| \rightarrow d$$

Aplicando la desigualdad del paralelogramo para $u = f - v_n$ y $v = f - v_m$, con $n, m \in \mathbb{N}$

$$\begin{aligned} \left\| \frac{f - v_n + f - v_m}{2} \right\|^2 + \left\| \frac{f - v_n - (f - v_m)}{2} \right\|^2 &= \frac{1}{2} (\|f - v_n\|^2 + \|f - v_m\|^2) \\ \left\| f - \frac{v_n + v_m}{2} \right\|^2 + \left\| \frac{v_m - v_n}{2} \right\|^2 &= \frac{1}{2} (\|f - v_n\|^2 + \|f - v_m\|^2) \\ \frac{\|v_m - v_n\|^2}{4} &= \frac{1}{2} (\|f - v_n\|^2 + \|f - v_m\|^2) - \left\| f - \frac{v_n + v_m}{2} \right\|^2 \\ \|v_m - v_n\|^2 &= 2 (\|f - v_n\|^2 + \|f - v_m\|^2) - 4 \left\| f - \frac{v_n + v_m}{2} \right\|^2 \end{aligned}$$

Como K es convexo y $v_n, v_m \in K$ tendremos que $d \frac{v_n + v_m}{2} \in K$ y además $\left\| f - \frac{v_n + v_m}{2} \right\| \geq d$ por lo que tenemos

$$\|v_m - v_n\|^2 = 2 (\|f - v_n\|^2 + \|f - v_m\|^2) - 4d^2$$

Cuando $n \rightarrow \infty$ tenemos que $\|f - v_n\| \rightarrow d$ y $\|f - v_m\| \rightarrow d$ por lo que el término de la derecha tenderá a 0 cuando $n, m \rightarrow \infty$. Esto significa que la sucesión $\{v_n\}$ es de Cauchy.

Como H es de Hilbert, en particular es completo por lo que sabemos que $\{v_n\} \rightarrow u$ en $(H, (\cdot, \cdot))$.

Como además $\{v_n\} \subset K$ y K es cerrado, el límite $u \in K$. Tendremos que

$$d = \lim_{n \rightarrow \infty} \|f - v_n\| = \|f - u\|$$

Y tendremos probada la existencia de u .

Veamos ahora la equivalencia entre la primera y la segunda parte del teorema, es decir

$$\left. \begin{array}{l} u \in K \\ \|f - u\| = \text{dist}(f, K) \end{array} \right\} \iff \left\{ \begin{array}{l} u \in K \\ (f - u, v - u) \leq 0 \quad \forall v \in K \end{array} \right.$$

Veamos las dos implicaciones:

\Rightarrow) Supongamos que $u \in K$ y sabemos que $\|f - u\| \leq \|f - v\|$ para todo $v \in K$. Tomamos ahora $w \in K$ y consideramos el segmento que une u con w . Entonces $\forall w \in K$ y $\forall t \in [0, 1]$, al ser K convexo tendremos que

$$(1 - t)u + tw \in K \quad \text{y} \quad \|f - u\|^2 \leq \|f - (1 - t)u - tw\|^2$$

Aplicando la bilinealidad podemos reescribir esta última expresión como

$$\begin{aligned} \|f - (1 - t)u - tw\|^2 &= (f - (1 - t)u - tw, f - (1 - t)u - tw) = \\ &= \|f - u\|^2 + t^2\|w - u\|^2 - 2t(f - u, w - u) \end{aligned}$$

Sustituyendo en la expresión que teníamos anteriormente nos queda que:

$$0 \leq t^2\|w - u\|^2 - 2t(f - u, w - u) \quad \forall t \in (0, 1]$$

Al dividir entre t nos queda

$$0 \leq t\|w - u\|^2 - 2(f - u, w - u) \quad \forall t \in (0, 1]$$

y tomando ahora el límite cuando t tiende a 0 por la derecha queda que

$$0 \leq -2(f - u, w - u) \Rightarrow (f - u, w - u) \leq 0$$

Se deja como ejercicio demostrar la otra implicación y la unicidad de u . □

Proposición 0.3. La aplicación dada por

$$\begin{aligned} P_K : H &\rightarrow H \\ f &\mapsto P_K f \end{aligned}$$

es Lipschitziana, es decir, $\|P_K f_1 - P_K f_2\| \leq \|f_1 - f_2\|$ para todo $f_1, f_2 \in H$.

Demostración. Tomamos $f_1, f_2 \in H$ y consideramos $u_1 = P_K f_1$, $u_2 = P_K f_2$ y tenemos que

$$\begin{aligned} (f_1 - u_1, v - u_1) &\leq 0 \quad \forall v \in K \\ (f_2 - u_2, v - u_2) &\leq 0 \quad \forall v \in K \end{aligned}$$

De aquí obtenemos que

$$\begin{aligned} (f_1 - u_1, u_2 - u_1) &\leq 0 \\ (f_2 - u_2, u_1 - u_2) &\leq 0 \end{aligned}$$

Aprovechando la bilinealidad tenemos que

$$(f_2 - u_2, u_2 - u_1) \geq 0 \Rightarrow ((f_1 - u_1) - (f_2 - u_2), u_2 - u_1) \leq 0$$

Y además

$$\begin{aligned} ((f_1 - u_1) - (f_2 - u_2), u_2 - u_1) &= ((f_1 - f_2) - (u_1 - u_2), u_2 - u_1) = \\ &= (f_1 - f_2, u_2 - u_1) + (u_2 - u_1, u_2 - u_1) \end{aligned}$$

Y aplicando la desigualdad de Cauchy-Schwarz

$$\begin{aligned} \|u_2 - u_1\|^2 &= (u_2 - u_1, u_2 - u_1) \leq -(f_1 - f_2, u_2 - u_1) \\ &\leq \|f_1 - f_2\| \|u_2 - u_1\| \Rightarrow \|u_2 - u_1\| \leq \|f_1 - f_2\| \end{aligned}$$

□

Corolario 0.3.1 (Proyección ortogonal). Sea H un espacio de Hilbert y $\emptyset \neq M \subset H$ un subespacio vectorial cerrado. Entonces se tiene que

$$\forall f \in H \quad \exists u \in M \text{ tal que } \|f - u\| = \text{dist}(f, M)$$

Además, u está caracterizado por

-) $u \in M$
-) $(f - u, w) = 0 \quad \forall w \in M$

Además, $P_M : H \rightarrow H$ es lineal.

Demostración. Comencemos con la primera parte del corolario. Sabemos que $u \in K$ y $(f - u, v - u) \leq 0 \quad \forall v \in M$ del teorema de la proyección. Tendremos que probar la equivalencia entre esto y $(f - u, w) = 0 \quad \forall w \in M$ cuando M es un subespacio vectorial. Veamos ambas implicaciones:

\Leftarrow) Evidente por ser M un espacio vectorial.

\Rightarrow) Tenemos que $(f - u, v - u) \leq 0 \quad \forall v \in M$. Tomamos ahora $v \in M$, $t \neq 0$ y como M es un subespacio vectorial, entonces $\frac{v}{t} \in M$ por lo que

$$(f - u, \frac{v}{t} - u) \leq 0 \quad \forall v \in M, t \neq 0$$

Hagamos una distinción de casos:

$$\begin{cases} \text{Si } t > 0 & \Rightarrow (f - u, v - tu) \leq 0 \quad \forall t > 0, v \in M \\ \text{Si } t < 0 & \Rightarrow (f - u, v - tu) \geq 0 \quad \forall t < 0, v \in M \end{cases}$$

Tomando límite cuando t tiende a 0

$$\begin{cases} (f - u, v) \leq 0 \quad \forall t > 0, v \in M \\ (f - u, v) \geq 0 \quad \forall t < 0, v \in M \end{cases}$$

Y por tanto $(f - u, v) = 0 \quad \forall v \in M$

La demostración de que P_M es lineal se deja como ejercicio.

□

0.2. Espacios Duales

Definición 0.3 (Dual algebraico). Sea E un espacio vectorial, llamamos **dual algebraico** al siguiente espacio:

$$E^\# = \{f : E \rightarrow \mathbb{R} : f \text{ es lineal}\}$$

Definición 0.4 (Dual topológico). Dado $(E, \|\cdot\|)$ un espacio normado, llamamos **dual topológico** a

$$E^\# = \{f : E \rightarrow \mathbb{R} : f \text{ es lineal y continua}\}$$

Observación. Si tenemos $(E, \|\cdot\|_E)$, $(F, \|\cdot\|_F)$ dos espacios normados y una aplicación $T : E \rightarrow F$ lineal. Son equivalentes:

- (i) T es continua
- (ii) T es continua en 0
- (iii) $T(B_E(0, 1))$ es un conjunto acotado de F , es decir que $\exists R > 0 : \|T(x)\|_F \leq R \quad \forall x \in E \text{ con } \|x\| < 1$
- (iv) T es acotada, es decir, $T(A)$ es acotada en F para todo $A \subset E$ que esé acotado
- (v) T es Lipschitziana.

La demostración se deja como ejercicio.

Definición 0.5. Dado E un espacio vectorial, consideramos su dual topológico E^* y definimos la norma

$$\|f\|_{E^*} := \sup_{\|x\| \leq 1} \|f(x)\| \quad \forall f \in E^*$$

Ejercicio 0.2.1. Demostrar que $\|f\|_{E^*}$ es una norma.

Ejercicio 0.2.2. Demostrar que $(E^*, \|\cdot\|_{E^*})$ es de Banach.

Ejercicio 0.2.3. Demostrar que $\|f\|_{E^*} = \inf\{M \geq 0 : \|f(x)\| \leq M\|x\|_E \quad \forall x \in E\}$

0.3. Espacio Dual de un Espacio de Hilbert

Observación. Es elemental que si tomo $v \in H$, entonces la aplicación

$$\begin{aligned} \varphi_v : H &\rightarrow \mathbb{R} \\ u &\mapsto \varphi(u) = (u, v) \end{aligned}$$

verifica que $\varphi_v \in H^*$ y $\|\varphi_v\|_{H^*} = \|v\|_H$. Además, podemos definir la siguiente aplicación:

$$\begin{aligned} \Psi : H &\rightarrow H^* \\ v &\mapsto \phi_v \end{aligned}$$

que será lineal por lo que tenemos que un espacio de Hilbert y su dual topológico serán isomorfos.

Demostración. La demostración se deja como ejercicio. □

Teorema 0.4 (Teorema de Riesz-Fischer). Para toda $\varphi \in H^*$, se tiene que $\exists_1 v \in H$ tal que $\varphi(u) = (u, v) \quad \forall u \in H$. Además, se tiene que $\|\varphi\|_{H^*} = \|v\|_H$