



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 . . . . .	13
0.4. Funcional de Minkowski de un conjunto . . . . .	19
0.5. Teorema de la aplicación abierta . . . . .	24
0.6. Espacio Bidual . . . . .	28
<b>1. Topologías Débiles</b>	<b>29</b>
1.1. Topología inicial . . . . .	29
1.2. Topología débil . . . . .	30



# 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. Dado<sup>1</sup>  $A \subset \mathbb{R}^N$  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

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

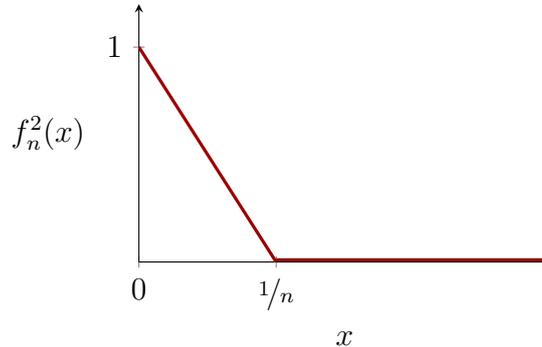
4. Tomamos  $K \subset \mathbb{R}^N$  compacto. Consideramos el conjunto de las funciones continuas en  $K$  denotado por  $\mathcal{C}(K)$  y el espacio  $(K, (\cdot, \cdot))$ , donde

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

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).

<sup>1</sup>la  $b$  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 forma<sup>2</sup>:

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

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 forma<sup>3</sup>:

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

<sup>2</sup>donde asumimos que  $1/\infty = 0$

<sup>3</sup>a.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

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

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  $\mathcal{L}^\infty$ .
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  $\mathcal{L}^\infty$ .

## 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  $\forall f \in H \exists_1 u \in K$  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

$$\forall f \in H \quad \exists_1 u \in M \text{ tal que } \|f - u\| = \text{dist}(f, M)$$

Además,  $u = F_M f$  está caracterizado por

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

Y se tiene que  $P_M : H \rightarrow H$  es lineal.

*Demostración.* Comencemos con la primera parte del corolario. Sabemos que  $u \in M$  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 esté acotado
- (v)  $T$  es Lipschitziana.

*Demostración.*

(v) $\Rightarrow$ (iv) ) Trivial

(iv) $\Rightarrow$ (iii) ) Trivial

(iii) $\Rightarrow$ (i) ) Trivial

(i) $\Rightarrow$ (ii) ) Trivial

(ii) $\Rightarrow$ (iii) ) Sabemos que  $T$  es continua en 0. Luego para  $\varepsilon = 1 \quad \exists \delta > 0$  tal que  $\|x\|_E < \delta$  luego  $\|T(x)\|_F < 1$ . Tenemos que

$$\|T(x - y)\| = \|T(x) - T(y)\| \leq M\|x - y\| \quad \forall x, y \in E$$

luego  $\|T(x)\| \leq M\|x\|$  para todo  $x \in E$ . De esta forma tenemos que

$$\|T(x)\| = \left\| T \left( \frac{x}{\|x\|} \cdot \|x\| \cdot \frac{\delta}{2} \cdot \frac{2}{\delta} \right) \right\| = \frac{2}{\delta} \left\| T \left( \frac{x}{\|x\|} \cdot \frac{\delta}{2} \right) \right\| < \frac{2}{\delta} \cdot \|x\|$$

(iii) $\Rightarrow$ (vi) ) Sabemos que  $A \subset E$  está acotado, luego  $T(A)$  también, es decir que  $T(A) \subset B(0, M)$  para cierto  $M > 0$ . Tenemos que probar que

$$T(A) \subset T(B(0, R)) \subset B(0, M)$$

Dado  $x \in A$  tal que  $\|x\| \leq R$ , como además es Lipschitziana tenemos que

$$\|T(x)\| \leq N\|x\| \leq N\|x\| < NR = M$$

y tenemos la inclusión que queríamos probar.

(iv) $\Rightarrow$ (ii) ) Por hipótesis tenemos que si  $\|x\| < 1$  entonces  $\|T(x)\| \leq R$  y queremos probar que  $\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0$  tal que si  $\|x\| < \delta$ , entonces  $\|T(x)\| < \varepsilon$ . Tomamos  $\delta = \frac{\varepsilon}{2R}$  y suponiendo que  $\|x\| < \delta$  tenemos que

$$\|T(x)\| = \left\| T \left( \frac{x}{2\|x\|} \cdot 2\|x\| \right) \right\| = 2\|x\| \left\| T \left( \frac{x}{2\|x\|} \right) \right\| \leq 2\|x\| R < 2\delta R = \varepsilon$$

y ya lo tenemos. □

**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  $\exists v \in H$  tal que  $\varphi(u) = (u, v) \quad \forall u \in H$ . Además, se tiene que  $\|\varphi\|_{H^*} = \|v\|_H$

**Ejercicio 0.3.1.** Sea  $H$  un espacio de Hilbert, y tomamos un elemento cualquiera  $y \in H$ . Consideramos  $f : H \rightarrow \mathbb{R}$  dada por  $f_y(x) = (x, y)$  para todo  $x \in H$ . Entonces se tiene que  $f_y$  es lineal, y además

$$|f_y(x)| = |(x, y)| \leq \|y\| \cdot \|x\| \quad \forall x \in H \Rightarrow f_y \text{ acotada}$$

con lo que  $\|f_y\|_{H^*} \leq \|y\|_H$ .

Con la definición de la norma tenemos que

$$\|f_y\|_{H^*} = \sup\{|(x, y)| : x \in H, \|x\|_H \leq 1\} \leq \|y\|_H \sup\{\|x\|_H : x \in H, \|x\|_H \leq 1\} = \|y\|_H$$

Comenzamos con el caso  $y \neq 0$  y tomamos  $x = \frac{y}{\|y\|_H}$  y tenemos que

$$|(x, y)| = \left| \left( \frac{y}{\|y\|_H}, y \right) \right| = \frac{1}{\|y\|_H} (y, y) = \|y\|_H$$

por lo que hemos visto que se alcanza el máximo por lo que  $\|f_y\|_{H^*} = \|y\|_H$ . Veamos ahora qué sucede cuando  $y = 0$ . En este caso tendremos  $f_y(x) = (x, 0)$  y por tanto se tiene directamente que  $\|f_y\|_{H^*} = 0 = \|y\|_H$ .

La linealidad se deja como ejercicio.

**Teorema 0.5** (Teorema de representación del dual de un espacio de Hilbert de Riesz-Fréchet). Sea  $H$  un espacio de Hilbert, entonces  $\forall f \in H^*$  existe un único  $y \in H$  tal que  $f(x) = (x, y) \quad \forall x \in H$ . Además,  $\|f\|_{H^*} = \|y\|_H$ .

*Demostración.* Solo tenemos que probar la primera parte, pues la segunda es consecuencia del ejercicio anterior. Para ello tomamos  $f \in H^*$  y tenemos dos casuísticas:

- ) Si  $f = 0$ , entonces puedo tomar  $y = 0$  y es evidente.
- ) Si  $f \neq 0$ , entonces tenemos que  $M = f^{-1}(\{0\}) \subsetneq H$  es un subespacio vectorial cerrado (imagen inversa de un cerrado por una función continua<sup>4</sup> y lineal<sup>5</sup>). Podemos aplicar entonces el teorema de la proyección ortogonal. Sabemos que  $\exists z_0 \in H \setminus M$ . Llamamos  $z_1 = P_M z_0 \in M$  y tenemos que  $(z_0 - z_1, v) = 0$  para todo  $v \in M$ . Definimos ahora

$$z = \frac{z_0 - z_1}{\|z_0 - z_1\|_H}$$

y está bien definido ya que  $z_0 \notin M$  y  $z_1 \in M$  luego  $z_0 - z_1 \neq 0$ . Es claro que  $\|z\| = 1$  y veamos cuánto vale  $(z, v)$  para todo  $v \in M$ :

$$(z, v) = \frac{1}{\|z_0 - z_1\|} (z_0 - z_1, v) = 0 \quad \forall v \in M$$

Veamos que  $z \notin M$ . Sabemos que  $M$  es un espacio vectorial y si  $z_0 - z_1$  estuviera en  $M$ , entonces  $z_0 \in M$  pero sabemos que  $z_0 \notin M$  luego  $z \notin M$  o equivalentemente  $f(z) \neq 0$  (por la definición de  $M$ ).

Tenemos ahora que para todo  $x \in H$  tenemos que  $x - \frac{f(x)}{f(z)}z \in M = \ker f$  ya que

$$f\left(x - \frac{f(x)}{f(z)}z\right) = f(x) - \frac{f(x)}{f(z)}f(z) = 0$$

<sup>4</sup>nos dice que es cerrado.

<sup>5</sup>nos dice que es espacio vectorial.

luego  $f(x) = f\left(\frac{f(x)}{f(z)}z\right)$  lo que nos dice que

$$0 = \left(z, x - \frac{f(x)}{f(z)}z\right) = (z, x) - \frac{f(x)}{f(z)} \Rightarrow f(x) = f(z)(z, x) = (x, f(z)z)$$

Por tanto, tomando  $y = f(z)z$  tenemos la existencia probada. Nos queda por ver la unicidad. Para ello, supongamos que existen  $y_1, y_2 \in H$  tal que  $f(x) = (x, y_1) = (x, y_2)$  para todo  $x \in H$ . Con esto tendríamos que  $(x, y_1 - y_2) = 0$  para todo  $x \in H$ . Elijo  $x = y_1 - y_2$  y tenemos que  $0 = (y_1 - y_2, y_1 - y_2) = \|y_1 - y_2\|^2$  por lo que finalmente  $y_1 = y_2$ .

□

Nos planteamos ahora qué ocurre cuando tenemos un espacio de Banach  $E$  y un subespacio  $G \subset E$ . Tenemos además una aplicación  $g : G \rightarrow \mathbb{R}$  lineal y continua. Lo que nos plantemos ahora es si existe una aplicación  $f : E \rightarrow \mathbb{R}$  lineal y continua tal que su restricción  $f|_G = g$ .

Que  $g$  sea continua es equivalente a decir que  $|g(x)| \leq k\|x\|$  para todo  $x \in G$  y queremos ver si se verifica la continuidad de  $f$ , es decir que  $|f(x)| \leq k\|x\|$  para todo  $x \in E$ .

**Ejercicio 0.3.2.** Definimos  $p(x) = k\|x\| \quad \forall x \in E$ . Probar que se verifican las siguientes propiedades:

1.  $p(x + y) \leq p(x) + p(y) \quad \forall x, y \in E$
2.  $p(\lambda x) = \lambda p(x) \quad \forall \lambda > 0, \quad \forall x \in E$

**Definición 0.6.** Sea  $\emptyset \neq P$  un conjunto con una relación  $\leq$  de orden (reflexiva, antisimétrica y transitiva). Entonces

- ) un subconjunto  $Q \subset P$  es **totalmente ordenado** si para cualesquiera dos elementos  $a, b \in Q$  se tiene que  $a \leq b$  o  $b \leq a$  (o ambas).
- ) Si  $Q \subset P$  y  $x \in P$ , diremos que  $x$  es **cota superior** de  $Q$  si  $a \leq x$  para todo  $a \in Q$ .
- ) Si  $m \in P$ , entonces diremos que  $m$  es un **elemento maximal** de  $P$  si

$$\{x \in P : m \leq x\} = \{m\}$$

es decir, no hay ningún elemento de  $P$  excepto  $m$  que esté por encima de  $m$ .

- ) Diremos que  $P$  es **inductivo** si todo subconjunto  $Q \subset P$  que sea totalmente ordenado posee una cota superior.

**Lema 0.6** (Lema de Zorn). Sea  $\emptyset \neq P$  un conjunto con una relación de orden  $\leq$ . Entonces se tiene que si  $P$  es inductivo, entonces  $P$  tiene un elemento máximo.

**Teorema 0.7** (versión analítica del teorema de Hanh-Banach). Supongamos que  $E$  es un espacio vectorial y tenemos  $p : E \rightarrow \mathbb{R}$  tal que se verifica

$$\begin{aligned} p(x + y) &\leq p(x) + p(y) \quad \forall x, y \in E \\ p(\lambda x) &= \lambda p(x) \quad \forall x \in E \quad \forall \lambda > 0 \end{aligned}$$

Sea  $G \subset E$  un subespacio vectorial y  $g : G \rightarrow \mathbb{R}$  una aplicación lineal verificando

$$g(x) \leq p(x) \quad \forall x \in G$$

Entonces se tiene que  $\exists f : E \rightarrow \mathbb{R}$  lineal verificando

$$\begin{aligned} f(x) &\leq p(x) \quad \forall x \in E \\ f|_G &= g \end{aligned}$$

*Demostración.* Definimos el siguiente conjunto

$$P = \left\{ h : D(h) \rightarrow \mathbb{R} : \begin{array}{l} G \subset D(h) \text{ subespacio vectorial de } E \\ h \text{ lineal, } h(x) \leq p(x) \quad \forall x \in D(h) \\ h(x) = g(x) \quad \forall x \in G \end{array} \right\}$$

y lo llamaremos **conjunto de extensiones** de  $g$ . Sabemos que  $P \neq \emptyset$  ya que  $g \in P$  (es una extensión de sí misma en el espacio  $P$ ). Necesitamos ahora definir una relación de orden. Lo haremos de la siguiente forma

$$h_1 \leq h_2 \iff \begin{cases} D(h_1) \subset D(h_2) \\ h_2|_{D(h_1)} = h_1 \end{cases} \quad \forall h_1, h_2 \in P$$

y diremos que  $h_2$  es una **extensión** de  $h_1$ . Se deja como ejercicio demostrar que  $\leq$  es una relación de orden.

Probemos ahora que  $P$  es inductivo. Para ello tendremos que probar que cualquier subconjunto suyo que esté totalmente ordenado tiene una cota superior. Sea  $Q \subset P$  totalmente ordenado. Consideramos

$$V_0 = \bigcup_{h \in Q} D(h)$$

y definimos la aplicación

$$\begin{aligned} h_0 : V_0 &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\mapsto h_0(x) = h(x) \quad \text{si } x \in D(h) \end{aligned}$$

Está bien definida como consecuencia de que el conjunto sea totalmente ordenado. Se deja como ejercicio demostrar que  $V_0$  es un subespacio vectorial, que  $h_0$  está bien definida, que es lineal y que  $h_0(x) \leq p(x)$  para todo  $x \in V_0$ .

Con esto tengo que  $h_0$  es una extensión de todas las  $h \in Q$ , es decir,  $h \leq h_0$  para todo  $h \in Q$  lo que nos dice que  $h_0$  es la cota superior de  $Q$ . Con esto podemos concluir que  $P$  es inductivo.

Tenemos todas las hipótesis necesarias para aplicar el teorema de Zorn, que nos dice que  $\exists f \in P$  elemento maximal de  $P$ , es decir,

$$f : D(f) \rightarrow \mathbb{R} \begin{cases} G \subset D(f) \subset E \\ f \text{ lineal, } f(x) \leq p(x) \quad \forall x \in D(f) \\ f|_G = g \end{cases}$$

Se deja como ejercicio demostrar que si  $f$  es maximal, entonces  $D(f) = E$  (por contrarrecíproco).

Para ello supongamos que por contradicción se tuviera  $D(f) \subsetneq E$  por lo que  $\exists x_0 \in E \setminus D(f)$ . Por tanto,

$$\begin{aligned} D(f) \oplus x_0\mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R} \\ x + tx_0 &\mapsto f(x) + t\alpha = \hat{f}(x + tx_0) \end{aligned}$$

Solo tendremos que ver que  $\hat{f}|_{D(f)} = f$  y que  $\hat{f}(x + tx_0) \leq p(x + tx_0)$  para todo  $x \in D(f)$ ,  $\forall t \in \mathbb{R}$ .

Sabemos que Esto es equivalente a

$$\begin{aligned} &\hat{f}(x + tx_0) \leq p(x + tx_0) \quad \forall x \in D(f), \forall t \in \mathbb{R} \iff \\ \iff &\hat{f}(t_z + tx_0) \leq p(t_z + tx_0) \quad \forall z \in D(f), \forall t \in \mathbb{R} \iff \\ \iff &t\hat{f}(z + x_0) \leq p(t(z + x_0)) = \begin{cases} tp(z + x_0) & t > 0 \\ -tp(-z - x_0) & t < 0 \end{cases} \iff \\ \iff &\begin{cases} f(z) + \alpha = \hat{f}(z + x_0) \leq p(z + x_0) & t > 0, z \in D(f) \\ -f(z) - \alpha = -\hat{f}(z + x_0) \leq p(-z - x_0) & t < 0, z \in D(f) \end{cases} \iff \\ \iff &\begin{cases} \alpha \leq -f(z) + p(z + x_0) \\ -f(z) - p(-z - x_0) \leq \alpha \end{cases} \quad \forall z \in D(f) \end{aligned}$$

Por lo que nos basta con demostrar lo siguiente

$$\sup\{f(-z) - p(-z - x_0) : z \in D(f)\} \leq \alpha \leq \inf\{-f(z) + p(z + x_0) : z \in D(f)\}$$

Podemos cambiar  $-z$  por un  $w \in D(f)$  cualquiera de la siguiente forma:

$$\sup\{f(w) - p(w - x_0) : w \in D(f)\} \leq \alpha \leq \inf\{-f(z) + p(z + x_0) : z \in D(f)\}$$

Veamos que esta desigualdad se verifica. Para cualesquiera  $z, w \in D(f)$

$$\begin{aligned} f(z) + f(w) = f(z + w) &\leq p(z + w) = p(z + x_0 - x_0 + w) \leq p(z + x_0) + p(w) - x_0 \Rightarrow \\ &f(w) - f(w - x_0) \leq -f(z) + p(z + x_0) \end{aligned}$$

y hemos probado que cualquier elemento del segundo conjunto es cota superior de todos los elementos del primer conjunto, lo que prueba la existencia del  $\alpha$  probando lo buscado.  $\square$

*Observación.* Sea  $E$  un espacio normado,  $f : E \rightarrow \mathbb{R}$  una aplicación no nula ( $f \neq 0$ ) y  $\alpha \in \mathbb{R}$ . Si  $f$  lineal y continua, entonces

$$[f = \alpha] = \{x \in E : f(x) = \alpha\} = f^{-1}(\{\alpha\})$$

es un hiperplano<sup>6</sup> cerrado<sup>7</sup>.

**Definición 0.7.** Si  $A, B \subset E$  es un espacio normado. Diremos que el hiperplano  $H = [f = \alpha]$  **separa**  $A$  y  $B$  si

$$\exists \alpha \in \mathbb{R} \text{ tal que } f(x) \leq \alpha \leq f(y) \quad \forall x \in A, \quad \forall y \in B$$

Diremos que **separa estrictamente**  $A$  y  $B$  si

$$\exists \varepsilon > 0 \text{ tal que } f(x) \leq \alpha - \varepsilon < \alpha + \varepsilon \leq f(y) \quad \forall x \in A, \quad \forall y \in B$$

**Teorema 0.8** (Primera forma geométrica del teorema de Hanh-Banach). Supongamos que  $E$  es un espacio normado,  $A, B \subset E$  dos subconjuntos de  $E$  no vacíos, disjuntos, es decir,  $A \cap B = \emptyset$ , convexos y con  $A$  abierto. Entonces existe un hiperplano cerrado  $H$  que separa  $A$  y  $B$ .

*Demostración.*

**Paso 1:** Vamos a considerar  $B = \{x_0\}$  y  $\emptyset \neq A \subset E$  abierto convexo con  $x_0 \notin A$ . Elijo  $C = A - z_0$ . Se deja como ejercicio probar que  $C$  es convexo y abierto con  $0 \in C$ . Probar también que  $y_0 = x_0 - z_0 \notin C$ .

Sabemos que  $\mathbb{R}y_0$  es un espacio de dimensión 1 y buscamos una función lineal, que en este espacio será de la forma

$$\begin{aligned} g : \mathbb{R}y_0 &\rightarrow \mathbb{R} \\ ty_0 &\mapsto g(ty_0) = t \end{aligned}$$

Buscamos ahora una aplicación  $f : E \rightarrow \mathbb{R}$  que extienda a  $g$  verificando  $f(x) \leq f(y_0) = g(y_0) = 1$  para todo  $x \in C$ . El teorema de Hanh-Banach nos dirá que existe un  $f : E \rightarrow \mathbb{R}$  lineal tal que

$$\begin{aligned} f(ty_0) &= t \quad \forall t \in \mathbb{R} \\ f(x) &\leq p(x) \quad \forall x \in E \end{aligned}$$

□

<sup>6</sup>basta con la linealidad (primer teorema de isomorfía)

<sup>7</sup>por ser  $f$  continua

## 0.4. Funcional de Minkowski de un conjunto

**Definición 0.8** (Funcional de Minkowski). Sea  $E$  un espacio normado y  $C \subset E$  convexo, abierto y tal que  $0 \in C$ . Consideramos la aplicación

$$p : E \rightarrow \mathbb{R}$$

$$x \mapsto p(x) = \begin{cases} \inf \{ \alpha > 0 : \frac{x}{\alpha} \in C \} & \text{si } \forall x \in E \setminus \{0\} \\ 0 & \text{si } x = 0 \end{cases}$$

y la llamaremos **funcional de Minkowski**.

**Propiedades.** El funcional de Minkowski verifica las siguientes propiedades:

1.  $p(\lambda x) = \lambda p(x) \quad \forall x \in E, \quad \forall \lambda > 0$
2.  $\exists M > 0$  tal que  $0 \leq p(x) \leq M \|x\| \quad \forall x \in E$
3.  $C = \{x \in E : p(x) < 1\}$
4.  $p(x + y) \leq p(x) + p(y) \quad \forall x, y \in E$

*Demostración.*

1.  $p(\lambda x) = \inf \{ \alpha > 0 : \frac{x}{\alpha/\lambda} = \frac{\lambda x}{\alpha} \in C \} = \lambda \inf \{ \alpha > 0 : \frac{x}{\alpha} \in C \} = \lambda p(x)$
2. Como  $C$  abierto y  $0 \in C$  sabemos que  $\exists r > 0 : B_E(0, r) \subset C$  y se tiene

$$\alpha > \frac{\|x\|}{r} \Rightarrow \left\| \frac{x}{\alpha} \right\| < r \Rightarrow \frac{x}{\alpha} \in B_E(0, r) \subset C$$

por lo que

$$\left( \frac{\|x\|}{r}, +\infty \right) \subset \left\{ \alpha > 0 : \frac{x}{\alpha} \in C \right\} \Rightarrow p(x) \leq \frac{\|x\|}{r}$$

3. Queremos ver que  $p(x) < 1$  para todo  $x \in C$ . Sabemos que si  $x \in C$  abierto, entonces  $\exists r > 0$  tal que  $B_E(x, r) \subset C$ . Tomamos ahora un  $\varepsilon > 0$  y queremos ver cuánto vale la siguiente norma:

$$\left\| \frac{x}{1+\varepsilon} - x \right\| = \left\| \frac{-\varepsilon x}{1+\varepsilon} \right\| = \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} \|x\|$$

Elegimos ahora un  $\varepsilon_0 > 0$  tal que

$$\frac{\varepsilon_0}{1+\varepsilon_0} < \varepsilon_0 < \frac{r}{\|x\| + 1}$$

y podemos afirmar que

$$\left\| \frac{x}{1+\varepsilon} - x \right\| < r \quad \forall \varepsilon \in (0, \varepsilon_0]$$

por lo que

$$\frac{x}{1+\varepsilon} \in B_E(x, r) \subset C \quad \forall \varepsilon \in (0, \varepsilon_0]$$

Acabamos de demostrar que  $p(x) \leq \frac{1}{1+\varepsilon}$  para todo  $\varepsilon \in (0, \varepsilon_0]$ . Hay algo mal en la demostración de este apartado. Se deja como ejercicio para el lector averiguar qué es lo que está mal (deberíamos haber empezado con  $(1+\varepsilon)x$  en vez de con  $\frac{x}{1+\varepsilon}$ ).

La otra inclusión la haremos sabiendo que si  $p(x) = \inf \{ \alpha > 0 : \frac{x}{\alpha} \in C \} < 1$ , entonces sabemos que  $\exists \alpha_0 < 1$  tal que  $\frac{x}{\alpha_0} \in C$ . Como además  $C$  es convexo y  $0 \in C$  tenemos que

$$x = \alpha_0 \cdot \frac{x}{\alpha_0} + (1 - \alpha_0) \cdot 0 \in C$$

4. Podemos afirmar que

$$\frac{x}{p(x) + \varepsilon} \in C \quad \forall \varepsilon > 0$$

y por el apartado anterior tenemos que

$$p\left(\frac{x}{p(x) + \varepsilon}\right) < 1$$

Como  $C$  es convexo, puedo considerar  $\frac{y}{p(y) + \varepsilon} \in C$  y cualquier combinación convexa de  $x$  e  $y$  estará en  $C$ . Consideramos

$$0 \leq t = \frac{p(x) + \varepsilon}{p(x) + p(y) + 2\varepsilon} \leq 1$$

y con este  $t$  formamos la siguiente combinación

$$t \frac{x}{p(x) + \varepsilon} + (1-t) \frac{y}{p(y) + \varepsilon} = \frac{x + y}{p(x) + p(y) + 2\varepsilon} \in C$$

por el apartado anterior tenemos que  $p(x + y) \leq p(x) + p(y)$ .

□

**Ejemplo.** Para  $C = B(0, 1)$  tenemos que  $p_C(x) = \|x\|$  (sale claramente si se piensa lo que se está haciendo).

**Teorema 0.9** (Primera forma geométrica del teorema de Hahn-Banach). Supongamos que  $E$  es un espacio normado,  $A, B \subset E$  dos subconjuntos de  $E$  no vacíos, disjuntos, es decir,  $A \cap B = \emptyset$ , convexos y con  $A$  abierto. Entonces existe un hiperplano cerrado  $H$  que separa  $A$  y  $B$ .

*Demostración.*

**Paso 1:** Vamos a considerar  $B = \{x_0\}$  y  $\emptyset \neq A \subset E$  abierto convexo con  $x_0 \notin A$ . Elijo  $C = A - z_0$ . Se deja como ejercicio probar que  $C$  es convexo y abierto con  $0 \in C$ . Probar también que  $y_0 = x_0 - z_0 \notin C$ .

Sabemos que  $G = \mathbb{R}y_0$  es un espacio de dimensión 1 y buscamos una función lineal, que en este espacio será de la forma

$$\begin{aligned} g : \mathbb{R}y_0 &\rightarrow \mathbb{R} \\ ty_0 &\mapsto g(ty_0) = t \end{aligned}$$

Considero  $p$  el funcional de Minkowski de  $C$ . Observemos

- Como  $y_0 \notin C \Rightarrow p(y_0) \geq 1$
- Si  $t > 0$ , entonces  $g(ty_0) = t \leq p(y_0) = p(ty_0)$
- Si  $t < 0$ , entonces  $g(ty_0) = t < 0 \leq p(ty_0)$

En cualquier caso tendremos que

$$g(ty_0) \leq p(ty_0) \quad \forall t \in \mathbb{R}$$

Usando el teorema de Hanh-Banach tenemos que existe un  $f : E \rightarrow \mathbb{R}$  lineal tal que

$$\begin{aligned} f|_G &= g \\ & \text{y} \\ f(y) &\leq p(y) \leq M\|y\| \quad \forall y \in E \end{aligned}$$

Por lo que podemos concluir que

$$|f(y)| \leq M\|y\| \quad \forall y \in E$$

lo que nos dice que  $f$  es continua. Nos queda probar que  $f$  es la aplicación que queremos buscar y por tanto tendremos que encontrar  $\alpha$ , es decir, probar que  $f(y) \leq 1 = f(y_0)$  para todo  $y \in C$ , lo que significaría que hemos separado  $C$  de  $y_0$ . Se deja como ejercicio.

**Paso 2:** Consideramos  $\emptyset \neq A \subset E$  abierto,  $\emptyset \neq B \subset E$  convexos tales que  $A \cap B = \emptyset$ . Consideramos

$$A - B = \{a - b : a \in A, b \in B\}$$

y como  $A \cap B = \emptyset$  sabemos que  $0 \notin (A - B)$ . Veamos ahora que  $A - B$  es abierto. Esto es muy sencillo ya que podemos escribir

$$A - B = \bigcup_{b \in B} (A - b)$$

y tenemos que es unión de abiertos trasladados que siguen siendo abiertos luego  $A - B$  es abierto. Se deja como ejercicio demostrar que  $A - B$  es convexo y terminar la demostración.

□

**Teorema 0.10** (Segunda forma geométrica del teorema de Hanh-Banach). Sea  $\emptyset \neq A \subset E$ ,  $\emptyset \neq B \subset E$  tal que  $A \cap B \neq \emptyset$  y con  $A$  y  $B$  convexos,  $A$  cerrado y  $B$  compacto. Entonces existe un hiperplano que separa estrictamente  $A$  y  $B$ , es decir,

$$\begin{aligned} & \exists f : E \rightarrow \mathbb{R} \text{ lineal y continua} \\ & \text{y} \\ & \exists \alpha \in \mathbb{R}, \exists \varepsilon > 0 : f(a) \leq \alpha - \varepsilon < \alpha < \alpha + \varepsilon \leq f(b) \quad \forall a \in A, \forall b \in B \end{aligned}$$

*Demostración.* Consideramos el conjunto  $C := A - B$  que sabemos que es convexo de la demostración del teorema anterior. Como  $A$  es cerrado y  $B$  es compacto sabemos que  $C$  es cerrado (se deja la demostración como ejercicio). Igual que antes, sabemos que  $0 \notin C$  y además, como  $C$  es cerrado tenemos que  $E \setminus C$  es abierto y tenemos que

$$\exists r > 0 : B_E(0, r) \cap C = \emptyset$$

Por la primera forma geométrica del teorema de Hanh-Banach podemos separar  $B_E(0, r)$  y  $C$ . El resto de la demostración se deja como ejercicio (la idea es separar estrictamente  $0$  de  $C$  y aprovechar la linealidad para separar estrictamente  $A$  de  $B$ ). □

**Lema 0.11.** Sean  $E, F$  espacios normados,  $T \in L(E, F)$ , entonces se tiene que

$$\sup_{\|x-x_0\|<r} \|T_x\| \geq r\|T\| \quad \forall x_0 \in E, \quad \forall r > 0$$

*Demostración.* Tenemos, para todo  $y \in E$  que

$$\begin{aligned} \|T_y\| &= \left\| T \left( \frac{1}{2}[x_0 + y - (x_0 - y)] \right) \right\| = \frac{1}{2} [\|T(x_0 + y)\| + \|T(x_0 - y)\|] \leq \\ &\leq \max\{\|T(x_0 + y)\|, \|T(x_0 - y)\|\} \quad \forall x_0 \in E \end{aligned}$$

Además,

$$\begin{aligned} r\|T\| &= \sup_{\|y\| \leq r} \|Ty\| \leq \sup_{\|y\| \leq r} \max\{\|T(x_0 + y)\|, \|T(x_0 - y)\|\} \leq \\ &\leq \sup_{\|z-x_0\| \leq r} \|Tz\| \end{aligned}$$

□

**Proposición 0.12** (Principio de acotación uniforme). Sea  $E$  un espacio de Banach,  $F$  espacio normado,  $\mathcal{F}$  una familia de operadores  $T \in L(E, F)$ . Si  $\sup_{T \in \mathcal{F}} \|T_x\| < \infty$  para todo  $x \in E$ , entonces  $\sup_{T \in \mathcal{F}} \|T\| < \infty$ .

*Demostración.* Por contradicción al absurdo. Supongamos que  $\sup_{T \in \mathcal{F}} \|T\| = \infty$ . Esto significa que existe una sucesión de operadores de  $\mathcal{F}$ ,  $\{T_n\} \subset \mathcal{F}$  con  $\|T_n\| \geq 4^n$  para

todo  $n \in \mathbb{N}$ . Tomo  $x_0 = 0$  y  $r = \frac{1}{3}$  y aplicamos el lema recién probado y llegamos a que existe un  $x_1 \in B(x_0, 1/3)$

$$\|T_1 x_1\| > \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{3} \|T_1\|$$

y seguimos contruyendo por inducción

$$\sup_{\|x - x_{n-1}\| < \frac{1}{3^n}} \|Tx\| \geq \frac{1}{3^n} \|T_n\| > \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{3^n} \|T_n\|$$

Esto nos da una sucesión  $\{x_n\} \subset E$  y veamos ahora que dicha sucesión es de Cauchy. Para ello tomamos  $m > n$  y tenemos

$$\begin{aligned} \|x_m - x_n\| &= \|x_m - x_{m-1} + x_{m-1} - x_{m-2} + \cdots + x_{n+1} - x_n\| \leq \\ &\leq \|x_m - x_{m-1}\| + \|x_{m-1} - x_{m-2}\| + \cdots + \|x_{n+1} - x_n\| \leq \frac{1}{3^n} + \frac{1}{3^{m-1}} + \cdots + \frac{1}{3^{n+1}} = \\ &= \frac{1}{3^n} \left[ \frac{1}{3^{m-n} + \cdots + \frac{1}{3}} \right] = \frac{1}{3^n} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{3^j} = \frac{1}{3^n} \cdot \frac{\frac{1}{3}}{1 - \frac{1}{3}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3^n} \end{aligned}$$

y tenemos que es de Cauchy en un espacio de Banach, luego  $\{x_n\}$  converge a un  $x \in E$ . Tenemos además

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \|x_m - x_n\| = \|\lim_{m \rightarrow \infty} (x_m - x_n)\| = \|x - x_n\| \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3^n}$$

Vamos a estimar la norma de  $T_n x$ . Para ello escribimos

$$\begin{aligned} \|T_n(x)\| &= \|T_n(x - x_n + x_n)\| \geq \|T_n(x_n)\| - \|T_n(x - x_n)\| \geq \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{3^n} \|T_n\| - \|T_n\| \|x - x_n\| \geq \\ &\geq \left( \frac{2}{3} - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{3^n} \|T_n\| = \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{3^n} \|T_n\| \geq \frac{1}{6} \left( \frac{4}{3} \right)^n \rightarrow \infty \end{aligned}$$

y en este caso tendríamos que

$$\sup_{T \in \mathcal{F}} \|Tx\| \geq \sup_{n \in \mathbb{N}} \|T_n x\| = \infty$$

por lo que llegamos a la contradicción buscada.  $\square$

**Lema 0.13** (Lema de Beire). Supongamos que  $X$  es un espacio métrico completo,  $X_n \subset X$  tal que  $X_n$  cerrado y  $\text{int} X_n = \emptyset$  para todo  $n \in \mathbb{N}$ . Etnonces se tiene que

$$\text{int} \left( \bigcup_{n=1}^{\infty} X_n \right) = \emptyset$$

*Observación.* El contrarrecíprodo del lema anterior sería:

Si  $X$  es un espacio métrico completo y  $X_n \subset X$  es cerrado  $\forall n \in \mathbb{N}$ . Entonces

$$\text{int} \left( \bigcup_{n=1}^{\infty} X_n \right) \neq \emptyset \Rightarrow \exists n_0 \in \mathbb{N} \text{ tal que } \text{int} X_{n_0} \neq \emptyset$$

Se recomienda ver este lema y su demostración en el libro de Brezis.

**Ejercicio 0.4.1.** Sean  $X, Y$  espacio de Banach,  $T \in L(X, Y)$  y definimos

$$\|y\|_n := \inf\{\|u\|_X + n\|v\|_Y : u \in X, v \in Y, y = T(u) + v\} \quad \forall n \in \mathbb{N}, \quad \forall y \in Y$$

Probar que  $\|\cdot\|_n$  es una norma en  $Y$  que verifica

$$\|y\|_n \leq n\|y\|_Y \quad \forall y \in Y$$

Además, si  $y = T(x)$ , con  $x \in X$  entonces se verifica

$$\|y\|_n \leq \|x\|_X$$

## 0.5. Teorema de la aplicación abierta

**Ejercicio 0.5.1.** Sea  $T : X \rightarrow Y$  lineal. Entonces se tiene que  $T$  es abierta si y solo si

$$\exists \delta > 0 \text{ tal que } B_Y(0, \delta) \subset T(B_X(0, 1))$$

**Teorema 0.14** (Teorema de la aplicación abierta). Sean  $X, Y$  espacios de Banach, y  $T \in L(X, Y)$  una aplicación sobreyectiva. Entonces  $T$  es abierta.

*Demostración.*

**Paso 1.** Vamos a demostrar en primer lugar que existe un  $r > 0$  tal que

$$B_Y(0, r) \subset \overline{T(B_X(0, 1))}$$

Para ello considero en el espacio  $Y$  la siguiente norma para todo  $n \in \mathbb{N}$ :

$$\|y\|_n = \inf\{\|u\|_X + n\|v\|_Y : u \in X, v \in Y, y = T(u) + v\} \quad \forall y \in Y$$

Abreviaremos la notación como

$$\|y\|_n = \inf_{y=T(u)+v} \{\|u\|_X + n\|v\|_Y\} \quad \forall y \in Y$$

entendiendo que es equivalente a la definición anterior. Consideramos ahora el siguiente espacio

$$Z \equiv \begin{array}{l} \text{espacio de todas las sucesiones } \{z_m\}_{m \in \mathbb{N}} \subset Y \\ \text{con un número finito de términos } z_m \text{ no nulo} \end{array}$$

y en dicho espacio podemos considerar

$$\|\{z_m\}_{m \in \mathbb{N}}\|_\infty = \max_{m \in \mathbb{N}} \|z_m\|_n$$

Se deja como ejercicio demostrar que esto es una norma en  $Z$ . Vamos a definir la aplicación

$$\begin{aligned} T_n : Y &\rightarrow Z \\ y &\mapsto T_n(y) = \{\delta_{nk}y\}_{k \in \mathbb{N}} \end{aligned}$$

donde  $\delta_{nk}$  es la aplicación delta de Kronecker,

$$\delta_{nk} = \begin{cases} 1 & \text{si } k = n \\ 0 & \text{si } k \neq n \end{cases}$$

Con estas definiciones tenemos que  $\forall y_1, y_2 \in Y$

$$\begin{aligned} T_n(y_1 + y_2) &= \{\delta_{nk}(y_1 + y_2)\}_{k \in \mathbb{N}} = \{\delta_{nk}y_1 + \delta_{nk}y_2\}_{k \in \mathbb{N}} = \\ &= \{\delta_{nk}y_1\}_{k \in \mathbb{N}} + \{\delta_{nk}y_2\}_{k \in \mathbb{N}} = \\ &= T_n(y_1) + T_n(y_2) \end{aligned}$$

por lo que  $T_n$  es lineal y además es continua con  $\|T_n\|_{L(Y,Z)} \leq n$ . Con esto tenemos que

$$\|T_n(y)\|_\infty = \|\{\delta_{nk}y\}_{k \in \mathbb{N}}\|_\infty = \max_{k \in \mathbb{N}} \|\delta_{nk}y\|_n = \|y\|_n \leq n\|y\|_Y$$

Vemos ahora que  $\forall y \in Y$  la sucesión  $\{T_n(y)\}_{n \in \mathbb{N}}$  está acotada. Como  $T$  es sobreyectiva sabemos que  $\exists x \in X$  tal que  $T(x) = y$  por lo que podemos escribir  $y = T(x) + 0$  y tomando  $u = x$ ,  $v = 0$  y con la definición de la norma anterior tenemos que

$$\|y\|_n \leq \|x\|_X + n\|0\| = \|x\|_X$$

por lo que  $\|T_n(y)\|_\infty \leq n\|y\|_Y \leq n\|x\|_X$  y tenemos que la sucesión  $\{T_n(y)\}_{n \in \mathbb{N}}$  está acotada. Por el principio de acotación uniforme sabemos que  $\{\|T_n\|(y)\}_{n \in \mathbb{N}}$  está acotada, es decir, que  $\exists M \geq 0$  tal que

$$\|T_n\|_{Y(Y,Z)} \leq M \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

lo que nos dice que

$$\|T_n(y)\|_\infty \leq M\|y\|_Y \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

Sea  $y \in B_Y(0, 1/M)$  y queremos ver que  $y \in \overline{T(B_X(0, 1))}$ . Para ello empecemos calculando

$$\|y\|_n = \inf_{y=T(u)+v} \{\|u\|_X + n\|v\|_Y\} \leq M\|y\|_Y < M \cdot \frac{1}{M} = 1$$

Vamos ahora a definir

$$A = \{\|u\|_X + n\|v\|_Y : y = T(u) + v, u \in X, v \in Y\}$$

y sabemos que  $\inf A < 1$ , luego  $\exists a_n \in A$  tal que  $\inf A < a_n < 1$

y podemos garantizar que  $\exists u_n \in X$ ,  $\exists v_n \in Y$  tales que si podemos escribir  $y = T(u_n) + v_n$ , entonces

$$\|u_n\| + n\|v_n\|_Y < 1$$

por lo que además por ser suma de cantidades positivas tenemos

$$\left. \begin{array}{l} \|u_n\|_X < 1 \\ n\|v_n\|_Y < 1 \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} \|u_n\|_X < 1 \\ \|v_n\|_Y < \frac{1}{n} \end{array} \right\}$$

Evaluamos ahora  $T$  en  $u_n$ .

$$T(u_n) = \{T(u_n) + v_n - v_n\} = \{y - v_n\} \xrightarrow{Y} y \quad (\text{cuando } n \rightarrow \infty)$$

Sabemos que  $v_n \rightarrow 0$  en  $Y$  cuando  $n \rightarrow \infty$  y  $T(u_n) \in T(B_X(0, 1))$  y como  $y = T(u_n) + v_n$  tendremos que  $y \in \overline{T(B_X(0, 1))}$  como queríamos demostrar.

**Paso 2.** Vamos a demostrar ahora que  $B_Y(0, r/2) \subset \overline{T(B_X(0, 1))}$ . Esto es equivalente a probar que

$$\frac{1}{2^n} B\left(0, \frac{r}{2^n}\right) \subset \overline{\frac{1}{2^n} \cdot T\left(B_X\left(0, \frac{1}{2^n}\right)\right)} \iff B\left(0, \frac{r}{2^n}\right) \subset \overline{T\left(B_X\left(0, \frac{1}{2^n}\right)\right)}$$

Veámoslo por inducción. Para  $n = 1$  tenemos que

$$y \in B_Y\left(0, \frac{r}{2}\right) \subset \overline{T\left(B_X\left(0, \frac{1}{2}\right)\right)} \Rightarrow \exists x_1 \in B_X\left(0, \frac{1}{2}\right) : \|y - T(x_1)\| < \frac{r}{2^2}$$

Tenemos entonces

$$\begin{aligned} y - T(x_1) &\in B_Y\left(0, \frac{r}{2^2}\right) \subset \overline{T\left(B_X\left(0, \frac{1}{2}\right)\right)} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \exists x_2 \in B_X\left(0, \frac{1}{2^2}\right) : \|y - T(x_1) - T(x_2)\| < \frac{r}{2^3} \end{aligned}$$

Si repetimos este proceso podemos llegar a que

$$\exists x_n \in B_X\left(0, \frac{1}{2^n}\right) : \|y - \sum_{k=1}^n T(x_k)\| < \frac{r}{2^{n+1}}$$

Por lo tanto, tendríamos que

$$\sum_{n=1}^{\infty} \|x_n\|_X \leq \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n} < \infty$$

por lo que  $\sum_{n \geq 1} x_n$  converge en norma<sup>8</sup>. Por ser  $X$  un espacio de Banach tenemos

que  $\sum_{n=1}^{\infty} x_n = x$ . Tenemos entonces  $\|x\|_X \leq \sum_{n=1}^{\infty} \|x_n\|_X < 1$ . Además, de lo anterior podemos concluir que

$$\|y - \sum_{k=1}^{\infty} T(x_k)\| < \frac{r}{2^{n+1}} \Rightarrow \sum_{k=1}^{\infty} T(x_k) = y$$

<sup>8</sup>o equivalentemente es de Cauchy

Y escribimos ahora

$$\begin{aligned} T(x) &= T\left(\sum_{k=1}^{\infty} x_k\right) = T\left(\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^N x_k\right) \stackrel{T \text{ cont.}}{=} \lim_{N \rightarrow \infty} T\left(\sum_{k=1}^N x_k\right) \\ &\stackrel{T \text{ lineal.}}{=} \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^N T(x_k) = \sum_{k=1}^{\infty} T(x_k) = y \in T(B_X(0, 1)) \end{aligned}$$

□

**Teorema 0.15** (Teorema de la gráfica cerrada). Sean  $E, F$  espacios de Banach,  $T : E \rightarrow F$  lineal. Entonces si  $T$  es continua si y solo si

$$Gr(T) = \{(x, T_x) : x \in E\}$$

es cerrado en  $E \times F$ .

*Demostración.*

⇒) Se deja como ejercicio.

⇐) Vamos a construir una nueva norma  $\|\cdot\|_T$  que la definimos como

$$\|x\|_T := \|x\|_E + \|T_x\|_F \quad \forall x \in E$$

Veamos que es una norma.

- (i)  $\|x\|_T \geq 0$  ya que es suma de dos normas.
- (ii)  $\|\lambda x\|_T = \|\lambda x\|_E + \|T(\lambda x)\|_F = |\lambda| \|x\|_E + |\lambda| \|T_x\|_F = |\lambda| \|x\|_T$ .
- (iii)  $\|x_1 + x_2\|_T = \|x_1 + x_2\|_E + \|T(x_1 + x_2)\| \leq \|x_1\|_E + \|x_2\|_E + \|T_{x_1}\|_F + \|T_{x_2}\|_F = \|x_1\|_T + \|x_2\|_T$

y ya tenemos probado que es una norma. Veamos ahora que es completa. En efecto si  $\{x_n\} \subset E$  es de Cauchy para  $\|\cdot\|_T$  se tiene que

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} : n, m \geq n_0 \Rightarrow \|x_n - x_m\|_E + \|T_{x_n} - T_{x_m}\|_F = \|x_n - x_m\|_T < \varepsilon$$

por lo que tenemos que

$$\begin{aligned} \{x_n\} \text{ de Cauchy para } \|\cdot\|_E &\stackrel{\text{E.Banach}}{\implies} \exists x \in E : \|x_n - x\|_E \xrightarrow{(n \rightarrow \infty)} 0 \\ \{T_{x_n}\} \text{ de Cauchy para } \|\cdot\|_F &\stackrel{\text{E.Banach}}{\implies} \exists y \in F : \|T_{x_n} - y\|_F \xrightarrow{(n \rightarrow \infty)} 0 \end{aligned}$$

Esto nos dice que  $\{(x_n, T_{x_n})\} \xrightarrow{E \times F} (x, y)$ . Además por hipótesis tenemos que  $\{(x_n, T_{x_n})\} \subset Gr(T)$  cerrado en  $E \times F$  luego se tiene que  $(x, y) \in Gr(T) \Rightarrow y = T_x$ .

$$\|x_n - x\|_T = \|x_n - x\|_E + \|T_{x_n} - T_x\|_F \xrightarrow{(n \rightarrow \infty)} 0$$

Por la definición de  $\|\cdot\|_T$  tenemos que

$$\|x\|_E \leq \|x\|_T \quad \forall x \in E$$

y por el teorema de la aplicación abierta sabemos que

$$\exists k \geq 0 : \|x\|_T \leq k\|x\|_E \quad \forall x \in E$$

luego se tiene que

$$\|x\|_E + \|T_x\|_F \leq k\|x\|_E \quad \forall x \in E \Rightarrow k \geq 1$$

es decir,

$$\|T_x\|_F \leq (k - 1)\|x\|_E \quad \forall x \in E$$

y tenemos entonces que es Lipschitziana y por tanto se tiene finalmente que  $T$  es continua en  $E$ .

□

## 0.6. Espacio Bidual

**Definición 0.9.** Dado  $E$  de Banach, entonces

$$(E^*, \|\cdot\|_{E^*}) \text{ de Banach con } \|f\|_{E^*} := \sup_{\|x\| \leq 1} |\langle f, x \rangle_{E^*, E}|$$

Tenemos  $\chi \in E^{**} = (E^*)^*$  donde

$$\begin{aligned} \chi : E^* &\rightarrow \mathbb{R} \text{ lineal y continua} \\ f &\mapsto \langle x, f \rangle_{E^{**}, E^*} \end{aligned}$$

y se tiene que

$$\|\chi\|_{E^{**}} = \sup_{\|f\|_{E^*} \leq 1} |\langle f, x \rangle_{E^{**}, E^*}|$$

Dado un  $x \in E$  podemos considerar  $\chi_x \in E^{**}$  y tendremos

$$\begin{aligned} \chi_x : E^* &\rightarrow \mathbb{R} \text{ lineal y continua} \\ f &\mapsto \langle f, x \rangle_{E^*, E} \end{aligned}$$

y tendremos que

$$\|\chi\|_{E^{**}} = \sup_{\|f\|_{E^*} \leq 1} |\chi_x(f)| = \sup_{\|f\|_{E^*} \leq 1} |\langle f, x \rangle_{E^*, E}| = \|x\|_E$$

Normalmente notaremos  $\chi_x = J(x)$ .

# 1. Topologías Débiles

## 1.1. Topología inicial

*Observación.* Si  $\tau_d := \{A : A \subset X\}$  es la topología discreta  $\Rightarrow \varphi_i$  es continua para todo  $\varphi : X \rightarrow Y$ , con  $Y$  espacio topológico.

**Definición 1.1.** Sea  $X$  un conjunto y  $\{\varphi_i : X \rightarrow Y_i : Y_i \text{ espacio topológico } i \in I\}$  una familia de funciones. Buscamos la topología  $\tau$  en  $X$  que contiene menos cantidad de abiertos para la que toda la familia de funciones  $\varphi_i$  son continuas.

Necesariamente  $\tau \supset U = \{\phi_i^{-1} : w_i \text{ abierto en } Y_i, i \in I\} \Rightarrow$  por lo que podemos reformular la búsqueda anterior de la siguiente forma: dado un conjunto  $X$  y una familia  $U = \{U_\lambda : \lambda \in \Lambda\}$  hallad la topología  $\tau$  con menos cantidad de abiertos que contiene a  $U$ .

Consideramos entonces el siguiente conjunto

$$\mathcal{V} := \left\{ V = \bigcap_{i=1}^n U_{\lambda_i} : \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n \in \Lambda, n \in \mathbb{N} \right\}$$

y vemos que es estable por intersecciones finitas, y no estable por uniones arbitrarias. Definimos entonces el siguiente conjunto:

$$\tau := \left\{ \bigcup_{\eta \in \Lambda_0} V_\eta : V_\eta \in \mathcal{V}, \Lambda_0 \subset \Lambda, \Lambda_0 \text{ arbitrario} \right\}$$

y es fácil probar que este conjunto es una topología<sup>1</sup> a la que llamaremos **topología inicial**.

Podemos considerar la siguiente base de entornos para cada  $x \in X$ :

$$\left\{ \bigcap_{i \in J} \varphi_i^{-1}(V_i) : V_i \text{ entorno de } \varphi_i(x) \text{ en } Y_i, I \supset J \text{ finito} \right\}$$

**Proposición 1.1.** Sea  $(X, \tau)$  un e.t,  $\tau$  la topología inicial y una sucesión  $\{x_n\} \subset X$ ,  $x \in X$ . Entonces

$$\{X_n\} \xrightarrow{\tau} \{\varphi_i(x_n)\} \xrightarrow{(n \rightarrow \infty)} \varphi_i(x), \quad \forall i \in I$$

---

<sup>1</sup>se hizo en Topología I

*Demostración.*

$\Rightarrow$ ) Es clara porque las  $\varphi_i$  son continuas en  $(X, \tau)$  para todo  $i \in I$ .

$\Leftarrow$ ) Sea  $U$  un entorno de  $x$ , entonces existe  $W = \bigcap_{i \in J} \varphi_i^{-1}(V_i)$  con  $V_i$  entorno de  $\varphi_i(x)$  en  $Y_i$  e  $I \supset J$  finito. Tenemos  $x \in W \subset U$ .

$$\left. \begin{array}{l} \varphi_i(x) \in V_i \\ \{\varphi_i(x_n)\} \xrightarrow{(n \rightarrow \infty)} \varphi_i(x) \end{array} \right\} \Rightarrow \exists N_i \in \mathbb{N} : \varphi_i(x_n) \in V_i, \quad \forall n \geq N_i$$

Como  $J$  es finito tenemos que existe  $N = \max_{i \in J} N_i$  luego  $\varphi_i(x) \in V_i, \quad \forall i \in J, \quad n \geq N$  por lo que

$$x_n \in W = \bigcap_{i \in J} \varphi_i^{-1}(V_i) \subset U, \quad \forall n \geq N$$

□

**Proposición 1.2.** Sea  $(X, \tau)$  un e.t. donde  $\tau$  es la topología inicial y  $Z$  un e.t. Si  $\psi : Z \rightarrow X$ , entonces se tiene que

$$\psi \text{ continua} \iff \varphi_i \circ \psi : Z \rightarrow Y_i \text{ continua } \forall i \in I$$

*Demostración.*

$\Rightarrow$ ) Regla de la cadena

$\Leftarrow$ )

$$\left. \begin{array}{l} U \subset X \\ U \text{ abierto} \end{array} \right\} \Rightarrow U = \bigcup_{\text{arbitrario finito}} \bigcap \varphi_i^{-1}(w_i) \text{ con } w_i \text{ abierto en } Y_i$$

por tanto se tiene que

$$\psi^{-1}(U) = \bigcup_{\text{arbitrario finito}} \bigcap \psi^{-1}(\varphi_i^{-1}(w_i)) = \bigcup_{\text{arbitrario finito}} \bigcap (\varphi_i \circ \psi)^{-1}(w_i)$$

y como  $(\varphi_i \circ \psi)^{-1}(w_i)$  es abierto en  $Z$  por ser  $(\varphi_i \circ \psi)$  continua, se tendrá que  $\psi^{-1}(U)$  es abierto y por tanto  $\psi$  continua.

□

## 1.2. Topología débil

**Definición 1.2.** Sea  $E$  un espacio normado y consideramos  $\sigma(E, E^*)$ , la topología inicial en  $E$  para

$$\begin{aligned} X &= E, \quad I = E^* \\ Y_f &= \mathbb{R}, \quad \forall f \in E^* \\ \{f : E &\rightarrow \mathbb{R} : f \in E^*\} \end{aligned}$$

que es una topología en  $E$  que hace continuas todas las aplicaciones de  $E^*$  y la llamaremos **topología débil** de un espacio normado  $E$ .

*Observación.*  $\sigma(E, E^*) \subset \tau_{\|\cdot\|_E}$

**Proposición 1.3.**  $\sigma(E, E^*)$  es Hausdorff<sup>2</sup>.

*Demostración.* Sean  $x_1, x_2 \in E$  con  $x_1 \neq x_2$ . Podemos considerar  $A = \{x_1\}$ ,  $B = \{x_2\}$  que son cerrados, convexos y disjuntos. Por la segunda forma geométrica del Teorema de Hahn-Banach tenemos que

$$\exists f \in E^* \setminus \{0\} \text{ y } \exists \alpha \in \mathbb{R} \text{ tal que } \langle f, x_1 \rangle < \alpha < \langle f, x_2 \rangle$$

tenemos entonces que

$$\begin{aligned} x_1 \in \Theta_1 &:= \{x \in E : \langle f, x \rangle < \alpha\} = f^{-1}((-\infty, \alpha)) \text{ abierto en } \sigma(E, E^*) \\ x_2 \in \Theta_2 &:= \{x \in E : \langle f, x \rangle > \alpha\} = f^{-1}((\alpha, +\infty)) \text{ abierto en } \sigma(E, E^*) \end{aligned}$$

□

**Proposición 1.4.** Sea  $x_0 \in E$ ,  $f_1, f_2, \dots, f_k \in E^*$

1.  $V = V(f_1, \dots, f_k; \varepsilon) = \{x \in E : |\langle f_i, x - x_0 \rangle| < \varepsilon, i = 1, \dots, k\}$  es un entorno de  $x_0$  en  $\sigma(E, E^*)$ .
2.  $\mathcal{V} = \{V(f_1, \dots, f_k; \varepsilon) : \varepsilon > 0, f_1, f_2, \dots, f_k \in E^*\}$  es base de entornos de  $x_0$  en  $\sigma(E, E^*)$ .

*Demostración.*

1. Definimos  $a_i := \langle f_i, x_0 \rangle$  y tenemos que

$$V = V(f_1, \dots, f_k; \varepsilon) = \bigcap_{i=1}^k f_i^{-1}(a_i - \varepsilon, a_i + \varepsilon)$$

es abierto y  $x_0 \in V$ .

2. Si  $U$  es entorno de  $x_0$  en  $\sigma(E, E^*)$ , entonces existe un entorno básico de  $\sigma(E, E^*)$  tal que

$$\exists k \in \mathbb{N}, \exists f_1, \dots, f_k \in E^* \text{ tal que } x_0 \in \bigcap_{j=1}^k f_j^{-1}(V_j) \subset U$$

con  $V_j$  entorno de  $f_j(x_0)$ . Entonces tenemos que

$$\exists \varepsilon > 0 : (f_j(x_0) - \varepsilon, f_j(x_0) + \varepsilon) \subset V_j, \forall j = 1, \dots, k$$

y llegamos a que  $V(f_1, \dots, f_k; \varepsilon) \subset \bigcap_{j=1}^k f_j^{-1}(V_j) \subset U$

□

**Ejercicio 1.2.1.** Probar que si  $\dim E < \infty$ , entonces  $\sigma(E, E^*) = \tau_{\|\cdot\|_E}$

<sup>2</sup>también denotado por T2

**Proposición 1.5.** Sea  $\{x_n\} \subset E$  con  $E$  espacio normado. Entonces se tiene que

1.  $\{x_n\} \xrightarrow{\sigma(E, E^*)} x \iff \{\langle f, x_n \rangle\} \rightarrow \langle f, x \rangle \quad \forall f \in E^*$ .
2.  $\{x_n\} \rightarrow x \implies \{x_n\} \xrightarrow{\sigma(E, E^*)} x$ .
3.  $\{x_n\} \xrightarrow{\sigma(E, E^*)} x \implies \{\|x_n\|\}$  acotada y  $\|x\| \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \|x_n\|$ .
- 4.

$$\left. \begin{array}{l} \{x_n\} \xrightarrow{\sigma(E, E^*)} x \\ \{f_n\} \xrightarrow{E} f \end{array} \right\} \implies \{\langle f_n, x_n \rangle\} \xrightarrow{\mathbb{R}} \langle f, x \rangle.$$

*Demostración.*

1.  $\sigma(E, E^*)$  es la topología inicial.
2. Tenemos que  $\{x_n\} \rightarrow x$  y además  $|\langle f, x_n - x \rangle| \leq \|f\|_{E^*} \|x_n - x\|_E$  por lo que  $\{\langle f, x_n \rangle\} \rightarrow \langle f, x \rangle$ .
3. Tenemos que  $B = \{x_n : n \in \mathbb{N}\}$  verifica  $f(B) = \{\langle f, x_n \rangle : n \in \mathbb{N}\}$  acotado  $\forall f \in E^*$ . Por la tercera consecuencia del teorema de Banach-Steinhaus tenemos que  $B$  está acotado. Tenemos entonces que

$$|\langle f, x_n \rangle| \leq \|f\|_{E^*} \|x_n\|_E \xrightarrow{1.} \langle f, x \rangle \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \|x_n\|$$

luego  $\sup_{\|f\|_{E^*} \leq 1} \langle f, x \rangle \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \|x_n\|$  y por el teorema de Banach-Steinhaus tenemos que  $\|x\|_E = \sup_{\|f\|_{E^*}} \langle f, x \rangle$ .

4.

$$\begin{aligned} |\langle f_n, x_n \rangle - \langle f, x \rangle| &\leq |\langle f_n - f, x_n \rangle| + |\langle f, x_n - x \rangle| \leq \\ &\leq \|f_n - f\| \|x_n\| + |\langle f, x_n \rangle - \langle f, x \rangle| \rightarrow 0 \end{aligned}$$

ya que  $\|f_n - f\| \rightarrow 0$ ,  $\|x_n\|$  está acotada y  $\langle f, x_n \rangle \rightarrow \langle f, x \rangle$ .

□

**Definición 1.3.** Sea  $f : (E, \tau) \rightarrow \mathbb{R}$  una aplicación, diremos que es **secuencialmente semicontinua inferiormente**<sup>3</sup> si

$$\forall \{x_n\} \xrightarrow{\tau} x \implies f(x) \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} f(x_n)$$

<sup>3</sup>término utilizado por Tonelli a principios del siglo XX