

Introducción al Análisis Matemático
(BORRADOR)

Índice general

1 Nociones Básicas de Topología	2
1.1 Espacios Métricos	2
1.1.1 Enfoque axiomático de las estructuras métricas	2
1.1.2 Bolas, esferas y diámetro	4
1.1.3 Conjuntos abiertos	5
1.1.4 Interior de un conjunto y entornos	6
1.1.5 Conjuntos cerrados y clausura de conjuntos	8
1.1.6 Ejercicios	11
1.2 Subespacios de un espacio métrico	13
1.2.1 Ejercicios	14
1.3 Espacios separables	15
1.3.1 Ejercicios	17
1.4 Funciones Continuas	18
1.4.1 Ejercicios	20
1.5 Homeomorfismos e isometrías	21
1.5.1 Ejercicios	23
1.6 Completitud	23
1.6.1 Sucesiones	23
1.6.2 Sucesiones de Cauchy, espacios métricos completos	24
1.6.3 Teorema de Cantor	26
1.6.4 Teorema de Baire	27
1.6.5 Ejercicios	28
1.7 Compacidad	30
1.7.1 Ejercicios	34
1.8 Conexión	36
1.8.1 Ejercicios	37
Bibliografía	39

1 Nociones Básicas de Topología

1.1 Espacios Métricos

1.1.1 Enfoque axiomático de las estructuras métricas

Uno de los conceptos fundamentales de la matemática es la noción de *distancia*. Esta noción está presente en multitud de actividades humanas, desde el comercio a la descripción del cosmos. En matemática medimos distancias en el plano y en el espacio y en las representaciones algebraicas de ellos \mathbb{R}^2 y \mathbb{R}^3 . Más generalmente en *espacios euclidianos* n -dimensionales \mathbb{R}^n . Desde comienzos del siglo XX los matemáticos fueron extendiendo la noción de distancia a conjuntos compuestos de los más diversos entes, matrices, funciones, funciones que actúan sobre funciones, etc. Esta ubicuidad y multiplicidad del concepto de distancia justifica un tratamiento axiomático de él.

Definición 1.1.1 Sea X un conjunto y $d : X \times X \rightarrow \mathbb{R}$ una función. Diremos que d es una *métrica* o *distancia* sobre X si satisface las siguientes propiedades:

- i) $\forall x \forall y : d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$.
- ii) $\forall x \forall y : d(x, y) = d(y, x)$.
- iii) $\forall x \forall y \forall z : d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$.

Si d es una métrica sobre X diremos, entonces, que el par (X, d) es un *espacio métrico*.

La desigualdad iii) en la definición anterior se denomina *desigualdad triángular*, esto debido a que se la puede pensar como la relación entre un lado de un triángulo y la suma de los otros dos, ver figura en el margen.

Veamos ahora algunos ejemplos de espacios métricos.

Ejemplo 1.1.1 La función módulo $|\cdot| : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ induce una métrica sobre \mathbb{R} , a saber: para $x, y \in \mathbb{R}$ definimos

$$d(x, y) = |x - y|. \quad (1.1)$$

Ejemplo 1.1.2 Sobre \mathbb{R}^n consideremos la función distancia d definida por

$$d(\mathbf{x}, \mathbf{y}) := \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}, \quad (1.2)$$

donde $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ e $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_n)$. Dejamos al alumno la demostración de que d es una métrica, ver Ejercicio 1.1.1 en la página 11. Esta métrica es conocida como *métrica euclídea* y es la métrica con la que estamos más familiarizados.

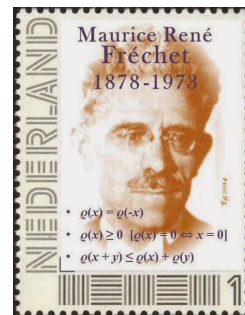
Ejemplo 1.1.3 Dado cualquier conjunto no vacío X , la función definida por:

$$d(x, y) := \begin{cases} 1, & \text{si } x \neq y; \\ 0, & \text{si } x = y. \end{cases}$$

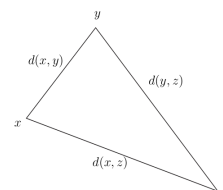
es una métrica. Esta métrica se denomina *métrica discreta*.

Ejemplo 1.1.4 Dado un conjunto X , definamos $\mathcal{A}(X)$ como el conjunto de todas las funciones acotadas $f : X \rightarrow \mathbb{R}$. Entonces $(\mathcal{A}(X), d)$ es una métrica, donde:

$$d(f, g) := \sup_{x \in X} |f(x) - g(x)|. \quad (1.3)$$



Maurice René Fréchet; (Maligny, 2 de septiembre de 1878 - París, 4 de junio de 1973) fue un matemático francés. Trabajó en topología, teoría de la probabilidad y la estadística. Sus trabajos en análisis funcional lo empujaron a buscar un marco más general que el espacio euclídeo introduciendo la noción de espacio métrico.



Desigualdad triangular

Ejemplo 1.1.5 Sea $\mathcal{C}([0, 1])$ el conjunto de funciones continuas $f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$. Entonces $(\mathcal{C}([0, 1]), d)$ es un espacio métrico, donde:

$$d(f, g) := \int_0^1 |f(x) - g(x)| dx. \quad (1.4)$$

Ejemplo 1.1.6 [Métrica caballo ajedrez] Sobre el conjunto \mathbb{Z}^2 definimos la métrica d por $d((x_0, y_0), (x_1, y_1))$ como la menor cantidad de movidas necesarias dar con un caballo de ajedrez para ir desde (x_0, y_0) a (x_1, y_1) .

Ejemplo 1.1.7 [Métrica de las geodesias] Sobre el conjunto

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

definimos para $P, Q \in S^2$ por

$$d_g(P, Q) = \arccos(\langle P, Q \rangle), \quad P, Q \in S^2,$$

donde $\langle P, Q \rangle$ denota el producto interno entre P y Q y para la función \arccos tomamos la rama con valores en el intervalo $[0, \pi]$. Entonces d_g es una métrica, que se denomina *métrica geodésica*. La afirmación de que d_g es métrica amerita justificación.

Recordemos que la *desigualdad de Cauchy Schwartz* afirma que

$$\langle P, Q \rangle \leq \|P\| \|Q\|, \quad (1.5)$$

donde $\|P\| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$. Además la igualdad en la desigualdad de Cauchy-Schwartz sólo es posible cuando $P = \lambda Q$ con $\lambda \geq 0$.

Si $d_g(P, Q) = 0$ significa que $\langle P, Q \rangle = 1$. Como $\|P\| = \|Q\| = 1$ tendríamos la igualdad en la desigualdad de Cauchy-Schwartz, luego $P = \lambda Q$. Tomando normas en la última igualdad $|\lambda| = 1$, de lo que terminamos por deducir que $\lambda = 1$, vale decir $P = Q$.

La afirmación $d_g(P, Q) = g(Q, P)$ es inmediata de la conmutatividad del producto interno.

Para la desigualdad triangular tomemos P, Q y R en S^2 . Definamos los vectores

$$U = P - \langle P, Q \rangle Q, \quad V = R - \langle R, Q \rangle Q.$$

Entonces un cálculo sencillo muestra queda

$$\langle U, Q \rangle = 0 = \langle V, Q \rangle. \quad (1.6)$$

Además

$$\begin{aligned} \|U\|^2 &= \langle P - \langle P, Q \rangle Q, P - \langle P, Q \rangle Q \rangle \\ &= 1 - \langle P, Q \rangle^2 = 1 - \cos^2(d_g(P, Q)) = \sin^2(d_g(P, Q)). \end{aligned} \quad (1.7)$$

De manera similar

$$\|V\|^2 = \sin^2(d_g(R, Q)). \quad (1.8)$$

Entonces

$$\begin{aligned} \langle P, R \rangle &= \langle U + \langle P, Q \rangle Q, V + \langle R, Q \rangle Q \rangle \\ &= \langle U, V \rangle + \langle P, Q \rangle \langle R, Q \rangle && \text{usando (1.6)} \\ &\geq -\|U\| \|V\| + \cos(d_g(P, Q)) \cos(d_g(R, Q)) && \text{Cauchy-Schwartz} \\ &= -\sin(d_g(P, Q)) \sin(d_g(R, Q)) \\ &\quad + \cos(d_g(P, Q)) \cos(d_g(R, Q)) && \text{por (1.7) y (1.8)} \\ &= \cos(d_g(P, Q) + d_g(R, Q)) && \text{fórmula adición} \end{aligned}$$

Se puede asumir que $d_g(P, Q) + d_g(R, Q) \leq \pi$ de lo contrario la desigualdad triangular es inmediata. Tomando \arccos en el primer y último término de la cadena de igualdades anteriores inferimos la desigualdad triangular.

1.1.2 Bolas, esferas y diámetro

Definido lo que es una métrica y un espacio métrico, pasamos a definir algunas entidades de carácter geométrico, esta son el concepto de *bola*, *esfera* y *diámetro*.

Definición 1.1.2 Sea (X, d) un espacio métrico, $x \in X$ y $r > 0$.

a) Definimos la bola abierta $B(x, r)$, con centro en x y radio r , por:

$$B(x, r) := \{y \in X : d(x, y) < r\}.$$

b) Definimos la esfera $E(x, r)$, con centro en x y radio r , por:

$$E(x, r) := \{y \in X : d(x, y) = r\}.$$

Todos tenemos una concepción de lo que entendemos por una bola, quizás se nos venga a la mente, y de hecho es un ejemplo, un círculo en \mathbb{R}^2 . No obstante, debemos proceder con cuidado. Estamos considerando métricas generales, ocurrirá que en algunos espacios métricos las bolas no se parecen a lo que comunmente entendemos por este concepto. Esto es debido a que en nuestra vida cotidiana estamos habituados a considerar la métrica euclídea, pero en este curso trabajaremos con métricas muy generales.

En \mathbb{R} , con la métrica dada por el módulo, la bola centrada en $x \in \mathbb{R}$ y radio r , no es mas que el intervalo $(x-r, x+r)$. En la figura ?? en la página ?? mostramos varios ejemplos de bolas en diferentes métricas sobre \mathbb{R}^2 , las demostraciones las desarrollaremos en la clase.

Todavía mas curiosas son las bolas respecto a la métrica discreta. Sea (X, d) un espacio métrico discreto y $x \in X$, entonces:

$$B(x, r) = \begin{cases} \{x\}, & \text{si } r < 1; \\ X, & \text{si } r \geq 1. \end{cases}$$

La esfera la podemos pensar como el borde de la bola, que no está incluida en la bola abierta. También tenemos en este caso situaciones que, en un primer momento, nos pueden parecer extrañas. Como casi siempre, el mayor "grado de extrañamiento" se consigue con la métrica discreta. En este caso, si (X, d) es un espacio métrico discreto, tenemos:

$$E(x, r) = \begin{cases} \{x\}, & \text{si } r = 0; \\ X - \{x\}, & \text{si } r = 1; \\ \emptyset, & \text{si } r \neq 0 \text{ y } r \neq 1. \end{cases}$$

Pasamos a definir, ahora, el concepto de diámetro de un conjunto.

Definición 1.1.3 Sea (X, d) un espacio métrico y $A \subset X$. Definimos el diámetro del conjunto A por:

$$\delta(A) := \sup_{x, y \in A} d(x, y).$$

Eventualmente, podría ocurrir que $\delta(A) = +\infty$.

La figura ?? en la página ?? explica, por si sola, el significado del concepto de diámetro.

Definición 1.1.4 Un conjunto no vacío A se dirá acotado si $\delta(A) < \infty$.

Es oportuno aclarar que el concepto de acotación depende del conjunto en si mismo y de la métrica. Así puede ocurrir que un mismo conjunto sea acotado con una métrica y con otra no.

Ejemplo 1.1.8 En el espacio \mathbb{R} , con la métrica del módulo, el conjunto $(0, +\infty)$ es no acotado. En cambio, con la métrica discreta todo conjunto, y en particular el dado, lo es.

También definiremos la distancia de un punto a un conjunto dado.

Definición 1.1.5 En un espacio métrico (X, d) se define la distancia de $x \in X$ a $A \subset X$ como

$$d(x, A) := \inf_{y \in A} d(x, y).$$

Demostremos que

$$\delta(B(x, r)) \leq 2r.$$

Efectivamente, dados z e y en la bola $B(x, r)$, tenemos, por la desigualdad triangular

$$d(y, z) \leq d(y, x) + d(x, z) \leq 2r.$$

Tomando supremo sobre z e y obtenemos la afirmación. Notar que ya no es cierto que $\delta(B(x, r)) = 2r$. En efecto, por ejemplo si (X, d) es un espacio métrico discreto, entonces $\delta(B(x, 1/2)) = 0$.

Ahora probaremos que la unión de conjuntos acostados es, a la vez, un conjunto acotado.

Proposición 1.1.1 Sean (X, d) un espacio métrico, A y B subconjuntos acotados de X . Entonces $A \cup B$ es acotado.

Dem. Tenemos que probar que:

$$\delta(A \cup B) < \infty.$$

Para esto, es suficiente demostrar que $\forall x, y \in A \cup B$ existe una constante M , independiente de x e y , tal que:

$$d(x, y) \leq M.$$

Sean $z \in A$ y $w \in B$ dos cualesquiera puntos en los conjuntos indicados. A través de esta demostración estos puntos estarán fijos, no importándonos que puntos sean, cualquiera conduce al mismo argumento. Tomemos, ahora, $x, y \in A \cup B$ cualesquiera, pero ya no estarán fijos. Si ocurriera que x e y estuvieran simultáneamente en uno mismo de los conjuntos, supongamos A , entonces tenemos que:

$$d(x, y) \leq \delta(A),$$

de modo que, en este caso, existe una constante M con la propiedad deseada. Debemos considerar el caso en que x e y estén en "conjuntos diferentes", digamos $x \in A$ e $y \in B$. Entonces tenemos:

$$d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, w) + d(w, y) \leq \delta(A) + d(z, w) + \delta(B).$$

El miembro derecho, de la desigualdad anterior, es independiente de x e y , de modo que quedó demostrada la proposición. \square

1.1.3 Conjuntos abiertos

Uno de los conceptos más importantes, sino el más, de la Topología es el de conjunto abierto.

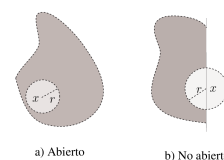
Definición 1.1.6 Sea (X, d) un e.m.^a. Diremos que $A \subset X$ es un conjunto abierto si $\forall x \in A \exists r > 0$ tal que:

$$B(x, r) \subset A.$$

^aAbreviación para espacio métrico

En la figura ?? en la página ?? podemos ver un ejemplo de conjunto abierto, en \mathbb{R}^2 con la métrica euclídea, y otro que no lo es. La diferencia es que en el conjunto b) el borde (en la parte recta del conjunto) forma parte del mismo conjunto, entonces si x está en este borde, toda bola centrada en x contiene puntos fuera del conjunto.

Un ejemplo, esperable, de conjunto abierto lo constituyen las bolas abiertas.



a) Abierto
b) No abierto
Conjuntos abiertos y no abiertos.

Proposición 1.1.2 Toda bola abierta es un conjunto abierto.

Dem. Sea $x \in X$ y $r > 0$. Consideremos la bola abierta $B(x, r)$. Para demostrar que la bola es abierta, hay que encontrar, para todo $y \in B(x, r)$, un $r' > 0$ tal que

$$B(y, r') \subset B(x, r). \quad (1.9)$$

Sea, pues, $y \in B(x, r)$. Tomemos:

$$r' := r - d(x, y).$$

Ver la figura ?? en la página ?? para un gráfico de la situación. Este r' es mayor que cero. En efecto, como y está en la bola, tenemos que $d(x, y) < r$.

Ahora, veamos la inclusión 1.9. Sea $z \in B(y, r')$, entonces tenemos, por la desigualdad triangular, que:

$$d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z) < d(x, y) + r' < r.$$

Así $z \in B(x, r)$, que es lo que queríamos demostrar. \square

Ahora damos dos propiedades de conjuntos abiertos que tendrán mucha trascendencia más adelante.

Teorema 1.1.1 Sea I un conjunto de índices y $\{A_i\}_{i \in I}$ una familia de conjuntos abiertos. Entonces:

- a) La unión $\bigcup_{i \in I} A_i$ es un conjunto abierto.
- b) Si I es finito, la intersección $\bigcap_{i \in I} A_i$ es un conjunto abierto.

Dem. Empecemos por la propiedad a). Sea x un punto en la unión, es decir existe algún índice i_0 tal que $x \in A_{i_0}$. Como este A_{i_0} es un conjunto abierto, deberá existir $r > 0$ tal que $B(x, r) \subset A_{i_0}$. Claramente la bola $B(x, r)$, al ser un subconjunto de A_{i_0} es un subconjunto de la unión de todos los A_i , que es lo que teníamos que probar.

Ahora veamos b). Podemos suponer que, para algún $n \in \mathbb{N}$, tenemos que $I = \{1, \dots, n\}$. Sea x un punto en la intersección. En este caso, $x \in A_i$, para todo i . Como cada A_i es abierto, existen radios r_i tales que $B(x, r_i) \subset A_i$. Definamos:

$$r := \min\{r_1, \dots, r_n\}.$$

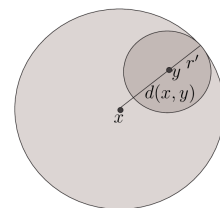
El mínimo existe, y es mayor que cero, pues hay una cantidad finita de radios. Ahora tenemos que, como $r \leq r_i$, $B(x, r) \subset B(x, r_i) \subset A_i$, para todo $i \in I$. Por consiguiente $B(x, r)$ es un subconjunto de la intersección de todos los A_i . \square

Es interesante notar que, en un e.m. discreto (X, d) , todo subconjunto $A \subset X$ es abierto. Efectivamente, en un e.m. discreto $B(x, 1/2) = \{x\}$ para todo $x \in X$. En particular, si $x \in A$ entonces $B(x, 1/2) \subset A$.

1.1.4 Interior de un conjunto y entornos

Como es costumbre, empezamos con una definición.

Definición 1.1.7 Sea (X, d) un e.m. y $A \subset X$. Definimos el interior de A , denotaremos este conjunto A^0 , como el conjunto de todos los puntos $x \in A$ tales que existe un $r > 0$ que satisface $B(x, r) \subset A$.



Construcción de r' .

Hay una gran similitud de esta definición con la de conjunto abierto. De hecho se tiene que un conjunto A es abierto si y solo si $A = A^0$.

En \mathbb{R}^2 con la métrica euclídea podemos visualizar el interior de un conjunto como la parte del conjunto que no está sobre el borde de él, ver figura 1.1.

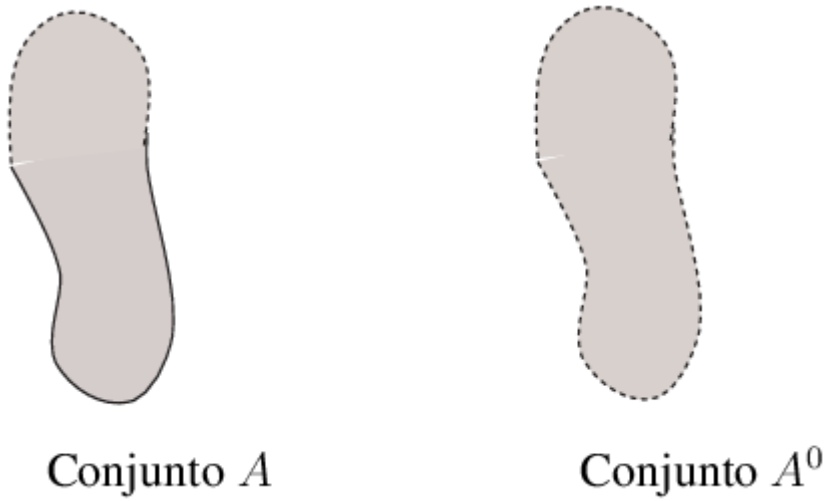


Figura 1.1: Interior de un conjunto

Tenemos una caracterización alternativa del interior de un conjunto.

Teorema 1.1.2 El interior de un conjunto A , es el mayor abierto contenido en A .

Dem. El hecho de que A^0 es abierto y está contenido en A , es consecuencia inmediata de la definición y lo dejamos como ejercicio. Vamos a demostrar que es el mayor de los abiertos contenido en A . Vale decir, hay que demostrar que si B es un abierto contenido en A , entonces $B \subset A^0$. Sea pues B abierto y $B \subset A$. Tomemos $x \in B$. Como B es abierto existe un $r > 0$ tal que $B(x, r) \subset B \subset A$. Así, necesariamente $x \in A^0$. Lo que demuestra que $B \subset A^0$. \square

Daremos algunas propiedades de la operación de tomar el interior de un conjunto.

Teorema 1.1.3 Sea (X, d) un e.m., A y B subconjuntos de X .

- a) $(A^0)^0 = A^0$
- b) Si $A \subset B$ entonces $A^0 \subset B^0$.
- c) $(A \cap B)^0 = A^0 \cap B^0$.

Dem. a) Como dijimos, A^0 es abierto, por ende $(A^0)^0 = A^0$.

b) A^0 es un abierto y además está contenido en B , por consiguiente $A^0 \subset B^0$.

c) Como $A \cap B \subset A$ tenemos que, a causa de b), $(A \cap B)^0 \subset A^0$. De la misma manera $(A \cap B)^0 \subset B^0$. Por consiguiente $(A \cap B)^0 \subset A^0 \cap B^0$. Para la otra inclusión, tener en cuenta que $A^0 \cap B^0$ es un abierto contenido en $A \cap B$, por lo tanto $A^0 \cap B^0 \subset (A \cap B)^0$. \square

Introducimos otro concepto.

Definición 1.1.8 En un e.m. el exterior de un conjunto A es el interior de su complemento. En símbolos ponemos $\text{Ext}(A) = (A^c)^0$.

Definición 1.1.9 Sea (X, d) un e.m. y $x \in X$. Diremos que V es un entorno de x si $x \in V^0$. También denotaremos por $E(x)$ al conjunto de todos los entornos de x .

El anterior es otro de los conceptos claves de la topología. Observemos que un conjunto abierto es entorno de cada uno de sus puntos. La recíproca es también cierta, es decir si un conjunto es entorno de cada uno de sus puntos entonces es abierto.

Proposición 1.1.3 La intersección de una cantidad finita de entornos de un punto x en un e.m. (X, d) es, a su vez, un entorno de x .

Dem. Sean $V_i, i = 1, \dots, n$, entornos de $x \in X$. Por definición $x \in V_i^0$ para todo $i = 1, \dots, n$. Entonces $x \in V_1^0 \cap \dots \cap V_n^0 = (V_1 \cap \dots \cap V_n)^0$. De modo que $V_1 \cap \dots \cap V_n$ es un entorno de x . Así queda establecida la propiedad que expresa la proposición. \square

1.1.5 Conjuntos cerrados y clausura de conjuntos

Ahora introduciremos el concepto de conjunto cerrado.

Definición 1.1.10 Un conjunto es cerrado si su complemento es abierto.

Esta sencilla definición hace las nociones de conjunto cerrado y abierto duales¹, así veremos que cada propiedad de conjuntos abiertos induce una correspondiente propiedad sobre conjuntos cerrados. Tener en cuenta esto en la siguiente teorema.

Teorema 1.1.4 Sea I un conjunto de índices y $\{F_i\}_{i \in I}$ una familia de conjuntos cerrados. Entonces:

- a) La intersección $\bigcap_{i \in I} F_i$ es un conjunto cerrado.
- b) Si I es finito, la unión $\bigcup_{i \in I} F_i$ es un conjunto cerrado.

Dem. La afirmaciones a) y b) de este teorema son duales de las a) y b) del Teorema 1.1.1 en la página 6. Por ejemplo, para demostrar a), observemos que, por definición, la siguiente es una familia de conjuntos abiertos: $\{F_i^c\}_{i \in I}$. De modo que por a) del Teorema 1.1.1 en la página 6 tenemos que:

$$\bigcup_{i \in I} F_i^c$$

es un conjunto abierto. De allí que el complemento de este conjunto es cerrado. Pero el complemento de este conjunto es, en virtud de las leyes de de Morgan, la intersección de todos los F_i . La propiedad b) se obtiene de la misma manera. \square

¹Dos tipos de conceptos son duales cuando cualquier afirmación sobre uno de ellos se convierte en una afirmación sobre el otro. En este proceso de "transformación de enunciados" hay que traducir cada concepto por su dual. Por ejemplo, en el caso que nos ocupa, un conjunto cerrado muta en abierto y las intersecciones mutan en uniones y viceversa. Uniones e intersecciones son duales como consecuencia de las leyes de de Morgan

Ejemplos de conjuntos cerrados son los intervalos cerrados de \mathbb{R} , con la métrica del módulo; las bolas cerradas en cualquier e.m., es decir los conjuntos de la forma:

$$B'(x, r) := \{y \in X : d(x, y) \leq r\}.$$

Las esferas también resultan ser conjuntos cerrados. Por otra parte, como en un e.m. discreto todo conjunto es abierto, todo conjunto, también, es cerrado. La demostración de que los anteriores son conjuntos cerrados las dejamos como ejercicios. A lo largo de esta materia veremos varios ejemplos mas de conjuntos cerrados, encomendamos al estudiante prestar atención a ellos, puesto que tan importante como aprender las definiciones y propiedades de determinado concepto, es conocer, y poder construir ejemplos de ese concepto.

El concepto de interior de un conjunto tiene su dual correspondiente.

Definición 1.1.11 Sea (X, d) un e.m.. La clausura de un conjunto $A \subset X$ se define y denota como se ve a continuación:

$$\overline{A} := (\text{Ext}(A))^c = [(A^c)^0]^c.$$

En \mathbb{R}^2 con la métrica euclídea podemos visualizar la clausura de un conjunto como el conjunto más su "borde", ver la figura 1.2.

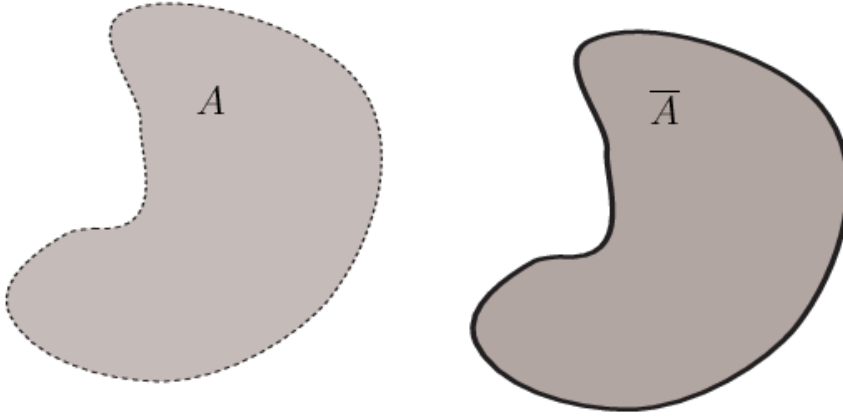


Figura 1.2: Clausura de un conjunto

Tenemos la siguiente caracterización alternativa de clausura de un conjunto.

Proposición 1.1.4 Sea (X, d) un e.m. y $A \subset X$. Son equivalentes:

- a) $x \in \overline{A}$.
- b) $\forall r > 0 : B(x, r) \cap A \neq \emptyset$.

Dem. Veamos primero que a) \Rightarrow b). Sea $x \in \overline{A}$. Por definición $x \notin (A^c)^0$. Así, por definición de conjunto interior, tenemos que para todo $r > 0$, $B(x, r) \not\subseteq A^c$. Es decir que para todo $r > 0$ existe $y = y_r \in B(x, r) \cap A$. Esto prueba b).

Veamos ahora que b) \Rightarrow a). Sea, pues, x un punto satisfaciendo la propiedad b). Toda bola de radio x y centro $r > 0$ corta al conjunto A . De modo que no existe una de tales bolas con la propiedad que este completamente contenida en el conjunto A^c . Esto nos dice, por definición de conjunto interior, que x no está en el interior de A^c . Dicho de otro modo $x \in [(A^c)^0]^c$. \square

Las propiedades del interior tienen propiedades duales correspondientes para la clausura.

Teorema 1.1.5 Sean (X, d) un e.m., A y B subconjuntos de X . Entonces tenemos que:

- a) $A \subset \overline{A}$.
- b) El conjunto \overline{A} es el menor conjunto cerrado que contiene a A .
- c) $\overline{\overline{A}} = \overline{A}$.
- d) Si $A \subset B$ entonces $\overline{A} \subset \overline{B}$.
- e) $\overline{A \cup B} = \overline{A} \cup \overline{B}$.
- f) $x \in \overline{A} \Leftrightarrow d(x, A) = 0$

Dem. Veamos a) cuya propiedad dual es que $C^0 \subset C$. En efecto, tenemos que:

$$(A^c)^0 \subset A^c.$$

Ahora, tomando complementos a ambos miembros², obtenemos que:

$$\overline{A} = [(A^c)^0]^c \supset (A^c)^c = A.$$

Esto prueba a).

Veamos b). El conjunto \overline{A} es cerrado pues es el complemento del abierto $(A^c)^0$. Sea F un conjunto cerrado que contiene a A , hay que demostrar que $F \supset \overline{A}$. Entonces, tomando complemento, tenemos que F^c es un abierto contenido en A^c . Como $(A^c)^0$ es el mayor abierto contenido en A^c , tenemos que $F^c \subset (A^c)^0$. Ahora tomemos complemento a esta última inclusión y obtenemos

$$F \supset [(A^c)^0]^c = \overline{A},$$

que es lo que queríamos demostrar.

Como corolario de b), obtenemos que A es cerrado si, y solo si, $\overline{A} = A$. A su vez, como corolario de esto, obtenemos c) y d).

Veamos e). Tenemos que:

$\overline{A \cup B} = [(A \cup B)^c]^0]^c$	Definición clausura
$= [(A^c \cap B^c)^0]^c$	Leyes de de Morgan
$= [(A^c)^0 \cap (B^c)^0]^c$	Propiedad dual del interior
$= [(A^c)^0]^c \cup [(B^c)^0]^c$	Leyes de de Morgan
$= \overline{A} \cup \overline{B}$	Definición de clausura

Que es lo que queríamos demostrar.

Por último demostraremos f). Si $x \in \overline{A}$ entonces, como consecuencia de la proposición 1.1.4 en la página anterior, tenemos que para todo $n \in \mathbb{N}$ existe un $y_n \in A$ tal que $d(x, y_n) < 1/n$, ver figura ?? en la página ??.

Tenemos así que

$$d(x, A) = \inf_{y \in A} d(x, y) \leq d(x, y_n) < \frac{1}{n}.$$

Y como la desigualdad es válida para todo $n \in \mathbb{N}$, obtenemos que $d(x, A) = 0$.

Recíprocamente, si $d(x, A) = 0$ entonces, por definición del ínfimo, para todo $r > 0$ existe un $y = y_r \in A$ tal que $d(x, y) < r$. Así tenemos que $B(x, r) \cap A \neq \emptyset$, para todo

²La operación de complemento invierte las inclusiones

$r > 0$. Esto, como sabemos, es equivalente a afirmar que $x \in \overline{A}$. \square

Por último estamos interesados en definir aquellos puntos que están en lo que hemos denominado, sin ninguna precisión, borde de un conjunto.

Definición 1.1.12 Diremos que x pertenece a la *frontera* de un conjunto A cuando x está en la clausura de A y en la clausura de A^c . Llamamos al conjunto de todos los puntos frontera de A la *frontera* de A y denotaremos este conjunto por ∂A .

La costumbre de denotar la frontera de un conjunto con el signo de una derivada proviene, suponemos, del cálculo sobre variedades donde se observa que cierta integral de una "derivada" sobre un conjunto es igual a la integral de la función sobre la frontera del conjunto. Este resultado se conoce como Teorema de Stokes. El Teorema fundamental del Cálculo es un caso particular de este teorema. Es en este contexto donde se consigue una conexión entre derivadas y fronteras.

1.1.6 Ejercicios

Ejercicio 1.1.1 Demostrar que los siguientes son espacios métricos.

- a) (\mathbb{R}, d) donde d está definida en 1.1 en la página 2.
- b) (\mathbb{R}^n, d) donde d está definida en 1.2 en la página 2. *Ayuda:* Usar la desigualdad de Cauchy-Schwartz $\forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \forall \mathbf{y} \in \mathbb{R}^n$:

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i \leq \sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i|^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n |y_i|^2}$$

- c) (\mathbb{R}^n, d) , donde d es la función definida en ?? en la página ??.
- d) (\mathbb{R}^n, d) , donde d es la función definida en ?? en la página ??.
- e) Probar que la métrica discreta es, valga la redundancia, una métrica.
- f) Demostrar que las ecuaciones 1.3 en la página 2 y 1.4 en la página 3 definen métricas.

Ejercicio 1.1.2 Sea (X, d) un espacio métrico. Demostrar que para todos x, y y z en X tenemos que:

$$|d(x, y) - d(x, z)| \leq d(y, z).$$

Ejercicio 1.1.3 Sea (X, d) un espacio métrico y $A \subset X$. Demostrar que:

$$|d(x, A) - d(y, A)| \leq d(x, y).$$

Ejercicio 1.1.4 Sea (X, d) un e.m., probar que las siguientes funciones son métricas sobre X :

- a) $d_1(x, y) := \min\{1, d(x, y)\}$.

$$b) d_2(x, y) := \frac{d(x, y)}{1 + d(x, y)}.$$

Ejercicio 1.1.5 Sea (X, d) un e.m.. Demostrar que $\forall x, y \in X$, existe entornos $U \in E(x)$ y $V \in E(y)$ tales que $U \cap V = \emptyset$.

Ejercicio 1.1.6 Sea (X, d) u e.m.. Demostrar las siguientes propiedades:

- a) Si $A \subset X$ es finito, entonces $X - A$ es abierto.
- b) Si $A \subset X$ es abierto, entonces para todo conjunto B se tiene que $A \cap \overline{B} \subset \overline{A \cap B}$.
- c) Si A es abierto entonces $A \subset (\overline{A})^0$.
- d) Si A es cerrado entonces $(\overline{A})^0 \subset A$.
- e) $(\overline{A})^0 = \overline{((\overline{A})^0)}$.
- f) $\overline{(A^0)} = \overline{((\overline{A^0})^0)}$.
- g) $A^0 = (\overline{A^c})^c$.
- h) $\partial A = \overline{A} - A^0$.
- i) $\text{Ext}(A) = (\overline{A})^c$.
- j) $\partial A^0 \subset \partial A$ y $\partial \overline{A} \subset \partial A$.
- k) $\partial(A \cup B) \subset \partial A \cup \partial B$, Si $\overline{A} \cap \overline{B} = \emptyset$ entonces vale la igualdad en la anterior inclusión.
- l) $d(A, B) = d(\overline{A}, \overline{B})$, donde por definición:

$$d(A, B) := \inf_{x \in A, y \in B} d(x, y).$$

Ejercicio 1.1.7 Dar ejemplos de:

- a) A y B abiertos de \mathbb{R} tales que los siguientes conjuntos sean todos diferentes: $\overline{A \cap B}, \overline{A} \cap \overline{B}, \overline{A} \cap B, A \cap \overline{B}$.
- b) A y B intervalos de \mathbb{R} tales que $A \cap \overline{B} \not\subset \overline{A \cap B}$.
- c) $A \subset \mathbb{R}^2$ tal que $\partial A = A$.
- d) A y B subconjuntos de \mathbb{R}^2 tales que entre los siguientes conjuntos no valga ninguna inclusión: $\partial A \cup \partial B - \partial(A \cap B)$ y $\partial(A \cup B)$.

Ejercicio 1.1.8 Demostrar que los siguientes conjuntos de \mathbb{R}^2 y \mathbb{R}^3 , son abiertos con la métrica euclidea:

- a) $\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : m < d((x, y), (0, 0)) < n\}$, donde $n, m \in \mathbb{N}$ y $m < n$.

b) $\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : 0 < x < 1, 0 < y < 1, x \neq \frac{1}{n} \forall n \in \mathbb{N}\}.$

c) $\{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : x, y, z \in \mathbb{Z}\}^c.$

Ejercicio 1.1.9 Hallar la frontera y el diámetro del conjunto $\{\frac{1}{n} : n \in \mathbb{N}\}.$

Ejercicio 1.1.10 Demostrar que el diámetro de la bola unitaria en \mathbb{R}^2 con la métrica euclídea es 2.

Ejercicio 1.1.11 Un e.m. (X, d) se dice ultramétrico si d verifica la desigualdad ultramétrica, es decir:

$$d(x, y) \leq \max\{d(x, z), d(z, y)\}.$$

Sea X un e.m. ultramétrico. Demostrar que:

- Si $d(x, y) \neq d(y, z)$ entonces $d(x, z) = \max\{d(x, y), d(y, z)\}.$
- Si $y \in B(x, r)$ entonces $B(x, r) = B(y, r).$ Como consecuencia las bolas abiertas son también conjuntos cerrados.
- Si $y \in \overline{B(x, r)}$ entonces $\overline{B(y, r)} = \overline{B(x, r)}.$ Las bolas cerradas son, también, conjuntos abiertos.
- Si dos bolas tienen intersección no vacía entonces una está contenida en la otra.
- La distancia de dos bolas abiertas distintas de radio r , contenidas en una bola cerrada de radio r , es igual a r .

Ejercicio 1.1.12 Si (X, d) es un e.m. demostrar que

$$d'(x, y) = \log(1 + d(x, y))$$

define una nueva métrica sobre X . ¿Que tipo de conjunto son las bolas de esta métrica?

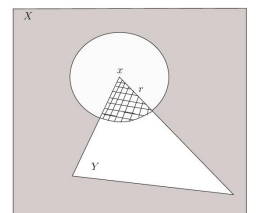
1.2 Subespacios de un espacio métrico

Sea (X, d) un e.m. e $Y \subset X$. La métrica d es una función definida sobre $X \times X$, luego podemos considerar su restricción a $Y \times Y$. Esta restricción también cumplirá, es inmediato verlo, los axiomas de una métrica. Por este motivo, el par (Y, d) es un e.m., por un abuso de notación denotaremos la restricción de d al conjunto $Y \times Y$ por el mismo símbolo d . Diremos que Y es un subespacio de X . Observar que la forma de las bolas en un subespacio puede ser diferente que en el espacio total, como puede verse en la figura ?? en la página ?. En este gráfico X es el espacio "total", Y el subespacio y x es un punto sobre la frontera de Y , entonces la bola en Y de centro x y radio r es la parte que quedo cuadrículada en el dibujo. Pongamos $B_Y(x, r)$ para la bola en Y de centro x y radio r , entonces tenemos la relación:

$$B_Y(x, r) := \{y \in Y : d(x, y) < r\} = B(x, r) \cap Y, \quad (1.10)$$

donde $B(x, r)$ es la bola en el espacio total.

El siguiente teorema nos da una relación de los abiertos y cerrados en Y con los abiertos y cerrados en X .



Una bola en un subespacio

Teorema 1.2.6 Sea (X, d) un e.m. e $Y \subset X$. Entonces:

- a) El conjunto A es abierto en Y si y solo si existe un G abierto en X tal que $A = G \cap Y$.
- b) El conjunto C es cerrado en Y si y solo si existe un cerrado F en X tal que $C = Y \cap F$.

Dem. Veamos, primero, la propiedad a). Sea A un abierto en Y . Para cada $x \in A$ existe, de acuerdo a la Ecuación 1.10 en la página anterior, un radio $r_x > 0$ tal que:

$$B(x, r_x) \cap Y \subset A. \quad (1.11)$$

Definamos:

$$G := \bigcup_{x \in A} B(x, r_x).$$

El conjunto G es abierto, pues la unión de conjuntos abiertos resulta abierto. Además

$$G \cap Y = \bigcup_{x \in A} B(x, r_x) \cap Y = A.$$

La última igualdad es cierta por la ecuación 1.11 y por que cada $x \in A$ está en el conjunto $B(x, r_x) \cap Y$. De modo que, encontramos el conjunto que cumple la propiedad a).

Ahora la demostración de b) es sencilla de obtener. Sea C cerrado en Y , en particular $C \subset Y$, entonces $Y - C$ es abierto en Y . Por a) existe un abierto G tal que:

$$Y - C = G \cap Y.$$

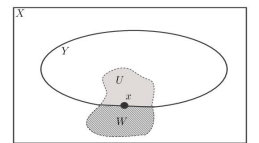
Entonces

$$C = Y \cap G^c.$$

Como el conjunto G^c es cerrado, obtenemos la tesis con $F = G^c$. \square

Proposición 1.2.5 Sea (X, d) un e.m. e $Y \subset X$ un subespacio. El conjunto $U \subset Y$ es un entorno de $x \in Y$ en el espacio (Y, d) si y solo si existe un entorno V de x en el e.m. (X, d) tal que $U = V \cap Y$.

Dem. Si U es un entorno de x en Y , entonces x está en el interior de U relativo a Y (pongamos U_Y^0 para este conjunto). Como U_Y^0 es un abierto en Y , por el teorema anterior, existe un abierto W tal que $U_Y^0 = Y \cap W$. Tomemos $V = W \cup U$. El conjunto V es un entorno de x en (X, d) , pues contiene al conjunto W que lo es. Además $V \cap Y = U$, lo que demuestra la aserción. \square



Demostración de la Proposición 1.2.5

Proposición 1.2.6 Sea (X, d) un e.m. e $Y \subset X$ un subespacio. Supongamos que $A \subset Y$. Entonces la clausura de A en el subespacio Y (denotemos esto por \overline{A}^Y) es igual a $\overline{A}^Y = \overline{A} \cap Y$.

Dem. El conjunto $\overline{A} \cap Y$ es un cerrado en Y que contiene al conjunto A , de modo que $\overline{A}^Y \subset \overline{A} \cap Y$. Veamos la otra inclusión. Sea $x \in \overline{A} \cap Y$. Como $x \in \overline{A}$ entonces para todo entorno U de x , tenemos que $U \cap A \neq \emptyset$. Como $A \subset Y$ tenemos que $(U \cap Y) \cap A = U \cap A \neq \emptyset$. Así, como $U \cap Y$ es un entorno arbitrario de x en el subespacio Y , tenemos que $x \in \overline{A}^Y$. \square

1.2.1 Ejercicios

Ejercicio 1.2.13 Sea (X, d) un e.m., $A \subset X$ y $B \subset A$. Demostrar que $B^0 \subset B_A^0$. Dar un ejemplo donde $B^0 \neq B_A^0$.

Ejercicio 1.2.14 Sea (X, d) un e.m., B y C subconjuntos de X y $A \subset C \cap B$. Demostrar que A es abierto (cerrado) en $B \cup C$ si, y solo si, es abierto (respectivamente cerrado) en B y C .

Ejercicio 1.2.15 Sea $\{G_i\}_{i \in I}$ un cubrimiento por abiertos de un e.m. X . Demostrar que $F \subset X$ es cerrado si, y solo si, $F \cap G_i$ es cerrado en G_i para todo $i \in I$.

Ejercicio 1.2.16 Dar un ejemplo de un subespacio A de \mathbb{R}^2 tal que exista una bola abierta que es un conjunto cerrado, pero no una bola cerrada, y una bola cerrada que es un conjunto abierto, pero no una bola abierta. Ayuda: Considerar A formado por los puntos $(0, 1)$, $(0, -1)$ y por un subconjunto apropiado del eje x .

1.3 Espacios separables

Definición 1.3.13 Sea (X, d) un e.m.. Un conjunto $A \subset X$ se dirá *denso en* $B \subset X$ si $\overline{A} \supset B$. Si el conjunto A es denso en X se dirá, brevemente, que A es *denso*.

Ejemplo 1.3.9 $\mathbb{R} - \{0\}$, \mathbb{Q} son densos en \mathbb{R} . **Ejemplo 1.3.10** Sea (X, d) un e.m discreto. Entonces A es denso si y solo si $A = X$. En efecto, tenemos que $\overline{A} = X$, de modo que si $x \in X$ todo entorno de x interseca al conjunto A . De modo que $B(x, 1/2) \cap A \neq \emptyset$. Pero, como se sabe, $B(x, 1/2) = \{x\}$, de modo que $x \in A$. Esto demuestra que $X = A$.

Definición 1.3.14 Un e.m. (X, d) se dirá separable si tiene un subconjunto denso y a lo sumo numerable.

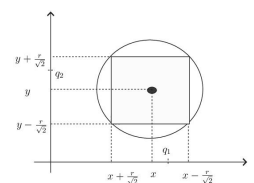
Ejemplo 1.3.11 Como se dijo \mathbb{Q} es un conjunto denso, además es numerable, por consiguiente \mathbb{R} es separable.

Ejemplo 1.3.12 \mathbb{R}^n con la métrica euclídea es separable. Afirmamos que \mathbb{Q}^n es un conjunto denso y numerable. Para verlo, tomemos $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ y veamos que está en $\overline{\mathbb{Q}^n}$. Para ello es suficiente probar que $B(x, r) \cap \mathbb{Q}^n \neq \emptyset$, para todo $r > 0$. Sea $r > 0$ un radio, no es muy difícil demostrar, ver la figura ?? en la página ??, la siguiente inclusión de un "cubo" en la bola:

$$(x_1 - \frac{r}{\sqrt{n}}, x_1 + \frac{r}{\sqrt{n}}) \times \dots \times (x_n - \frac{r}{\sqrt{n}}, x_n + \frac{r}{\sqrt{n}}) \subset B(x, r).$$

Como \mathbb{Q} es denso en \mathbb{R} existen racionales $q_i \in (x_i - \frac{r}{\sqrt{n}}, x_i + \frac{r}{\sqrt{n}})$, $i = 1, \dots, n$. En virtud de esto $(q_1, \dots, q_n) \in \mathbb{Q}^n \cap B(x, r)$. Y así queda establecida la afirmación.

Ejemplo 1.3.13 Un e.m. discreto (X, d) es separable si y solo si X es a lo sumo numerable. Como vimos en un ejemplo anterior el único conjunto denso que hay en un e.m. discreto es el total, de modo que si el espacio es separable X debe ser a lo sumo numerable.



Construcción del Ejemplo 1.3.12

Definición 1.3.15 En un e.m. (X, d) , una familia de conjuntos abiertos $\{G_i\}_{i \in I}$ se dirá *base* si todo abierto se puede obtener como unión de miembros de la familia. Más precisamente, si G es un abierto cualquiera existe un subconjunto de subíndices $J \subset I$ tal que:

$$G = \bigcup_{i \in J} G_i.$$

Ejemplo 1.3.14 En cualquier e.m. (X, d) la familia de todas las bolas es una base. También es una base la familia de todas las bolas con radio igual a $1/n$ con $n \in \mathbb{N}$. En efecto, si G es un abierto cualquiera, para todo $x \in G$ existe un $r_x > 0$ tal que $B(x, r_x) \subset G$. Así podemos ver que

$$G = \bigcup_{x \in G} B(x, r_x),$$

lo que demuestra que G lo podemos escribir como unión de bolas. Para el otro caso elegimos un natural n_x suficientemente grande para que $1/n_x < r_x$.

Proposición 1.3.7 Una familia de abiertos $\{G_i\}_{i \in I}$ es una base si y solo si para todo $x \in X$ y para todo entorno $U \in E(x)$, existe un $i \in I$ tal que:

$$x \in G_i \subset U.$$

Dem. \Rightarrow). Sea $x \in X$ y $U \in E(x)$. Como la familia es base, tenemos que U^0 es unión de miembros de la familia. Además, por definición, tenemos que $x \in U^0$, estos dos hechos implican la tesis.

\Leftarrow) Sea G un abierto. Por hipótesis, para cada $x \in G$ encontramos un $i_x \in I$ tal que $x \in G_{i_x} \subset G$. Así tenemos que:

$$G = \bigcup_{x \in G} G_{i_x}.$$

□

Teorema 1.3.7 Un e.m. es separable si y solo si existe una base a lo sumo numerable.

Dem. \Leftarrow). Sea $\{G_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ una base numerable de abiertos (si hubiera una base finita el razonamiento es idéntico). Elijamos $a_n \in G_n$. El conjunto $D := \{a_n : n \in \mathbb{N}\}$ es, entonces, a lo sumo numerable (¿Por qué?). Además, veamos que es denso. Efectivamente, sea $x \in X$ un punto arbitrario y $U \in E(x)$. Como consecuencia de la Proposición 1.3.7 existe un $n \in \mathbb{N}$ tal que $x \in G_n \subset U$. Ahora tenemos el punto $a_n \in G_n$, y por ello $U \cap D \neq \emptyset$. Probamos así que todo entorno de x interseca a D , en consecuencia $x \in \overline{D}$. Como el x es arbitrario, aquello prueba que D es un conjunto denso.

\Rightarrow). Sea D un conjunto denso y a lo sumo numerable. Definamos la siguiente familia de bolas abiertas:

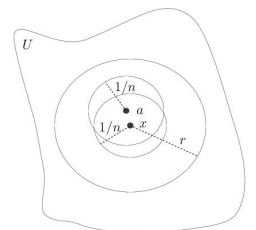
$$\mathcal{A} := \{B(x, \frac{1}{n}) : x \in D \wedge n \in \mathbb{N}\}.$$

Esta es una familia a lo sumo numerable, pues la siguiente función

$$\begin{aligned} T : \mathbb{N} \times D &\longrightarrow \mathcal{A} \\ (n, x) &\longmapsto B(x, \frac{1}{n}) \end{aligned}$$

(1.12)

es suryectiva.



Demostración del Teorema 1.3.7

Veamos que la familia propuesta es una base de abiertos usando la Proposición 1.3.7 en la página anterior. Sea $x \in X$ y $U \in \mathcal{E}(x)$. Como $x \in U^0$, podemos elegir $r > 0$ tal que $B(x, r) \subset U$. Sea, ahora, $n \in \mathbb{N}$ suficientemente grande, de modo que $2/n < r$. Como D es denso debe existir un $a \in D$ tal que $a \in B(x, \frac{1}{n})$. Observese que tenemos que $x \in B(a, 1/n)$, ver Figura ?? . Además, tenemos que $B(a, 1/n) \subset B(x, r) \subset U$. Para demostrarlo, tomemos $y \in B(a, 1/n)$. Entonces

$$d(x, y) \leq d(x, a) + d(a, y) < \frac{1}{n} + \frac{1}{n} = \frac{2}{n} < r.$$

Tenemos así que $x \in B(a, 1/n) \subset U$, como $B(a, 1/n)$ es un elemento de la familia propuesta, tenemos probada la propiedad de la Proposición 1.3.7 en la página anterior y, de este modo, la familia propuesta resulta una base. \square

Corolario 1.3.1 Un subespacio de un espacio separable es separable.

Dem. Sea (X, d) un e.m. e $Y \subset X$. Sea $\{G_n\}_{n \in I}$ una base a lo sumo numerable de abiertos. Es fácil demostrar que la familia $\{G_n \cap Y\}_{n \in I}$ es una base de los abiertos de Y . \square

1.3.1 Ejercicios

Ejercicio 1.3.17 Sea (X, d) un e.m. y $A \subset X$. Demostrar que $A \cup \text{Ext}(A)$ es denso en A . ¿Será cierto que $A^0 \cup \text{Ext}(A)$ es, siempre, denso?

Ejercicio 1.3.18 Demostrar que $\mathbb{I} := \mathbb{R} - \mathbb{Q}$ es separable. Exhibir un conjunto denso numerable.

Ejercicio 1.3.19 Sea $A \subset \mathbb{R}$. Definamos $B := \{x \in A \mid \exists y > x : (x, y) \cap A = \emptyset\}$. Demostrar que B es a lo sumo numerable.

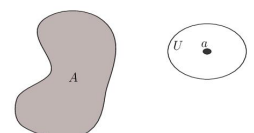
Ejercicio 1.3.20 Sea (X, d) un e.m. y $A \subset X$. Diremos que $a \in A$ es un *punto aislado* de A si existe un entorno U de a tal que $U \cap A = \{a\}$. En la Figura ?? en la página ?? el conjunto A consiste de la parte sombreada y el punto a , este último es un punto aislado, pues el entorno U satisface la definición.

Por otra parte, un punto $a \in X$ es un *punto de acumulación* de A si, para todo entorno U de a se tiene que $(U - \{a\}) \cap A \neq \emptyset$.

Sea A un conjunto, B el conjunto de puntos de acumulación de A y C el conjunto de puntos aislados de A . Demostrar los siguientes items:

- B es cerrado, y $\overline{A} = B \cup C$.
- Si X es separable entonces C es numerable.

Ejercicio 1.3.21 Demostrar que (X, d) es separable si y solo si todo cubrimiento de X por abiertos^a tiene un subcubrimiento a lo sumo numerable^b. Ayuda: Sea $\{U_i\}_{i \in I}$ un cubrimiento de X y $\{G_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ una base numerable. Para cada $n \in \mathbb{N}$



Punto aislado

elegir un i_n tal que $G_n \subset U_{i_n}$. Luego la familia $\{U_{i_n}\}_{n \in \mathbb{N}}$ será un cubrimiento.

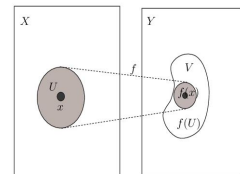
^aUn cubrimiento por abiertos de X es una familia de conjuntos abiertos $\{G_i\}_{i \in I}$ tal que $X = \bigcup_{i \in I} G_i$.

^bEs decir existe una subfamilia a lo sumo numerable de la familia $\{G_i\}$ que también es un cubrimiento.

1.4 Funciones Continuas

Vamos a ver que, en el contexto de los espacios métricos, podemos definir el concepto de que una función sea continua.

Definición 1.4.16 Sean (X, d) , (Y, d') dos e.m., $f : X \rightarrow Y$ una función y $x \in X$. Diremos que f es *continua en x* si para todo entorno $V \in E(f(x))$, existe un entorno $U \in E(x)$ tal que $f(U) \subset V$ (ver Figura ?? en la página ??). Diremos que $f : X \rightarrow Y$ es *continua* si es continua en cada punto de X .



Definición de función continua

Algunas veces es más práctico emplear las siguientes equivalencias de la definición de función continua en un punto.

Proposición 1.4.8 Sean (X, d) , (Y, d') dos e.m., $f : X \rightarrow Y$ una función y $x \in X$. Entonces son equivalentes:

- i) f es continua en x .
- ii) Para todo entorno V de $f(x)$, $f^{-1}(V)$ es un entorno de x .
- iii) Para todo $\varepsilon > 0$ existe un $\delta > 0$ tal que si $d(x, y) < \delta$ entonces $d'(f(x), f(y)) < \varepsilon$.

Dem. i) \Rightarrow ii). Sea V un entorno de $f(x)$. En virtud de la definición, existe un entorno U de x tal que $f(U) \subset V$. Así tenemos que $U \subset f^{-1}(V)$ y como U es un entorno de x , $f^{-1}(V)$ también lo es.

ii) \Rightarrow iii). Sea $\varepsilon > 0$. La bola $B(f(x), \varepsilon)$ es un entorno de $f(x)$, así, por ii), el conjunto $U := f^{-1}(B(f(x), \varepsilon))$ es un entorno de x . Entonces $x \in U^0$, lo que implica que existe un $\delta > 0$ tal que $B(x, \delta) \subset U$. Esta inclusión es otra forma de afirmar iii).

iii) \Rightarrow i). Sea V un entorno de $f(x)$. Entonces existe $\varepsilon > 0$ tal que $B(f(x), \varepsilon) \subset V$. Por iii), existe un $\delta > 0$ tal que si $d(x, y) < \delta$ entonces $d(f(x), f(y)) < \varepsilon$. Esto afirma que $f(B(x, \delta)) \subset B(f(x), \varepsilon)$. Como $B(f(x), \varepsilon) \subset V$, tenemos que $f(B(x, \delta)) \subset V$. Pero $B(x, \delta)$ es un entorno de x , de modo que hemos establecido que f es continua en x . \square

Ejemplo 1.4.15 Sea $f : X \rightarrow Y$ una función entre e.m.. Si (X, d) es discreto entonces f es continua. Vale decir si el dominio de una función es un e.m. discreto la función es continua, no importa que función sea ni, que sea el codominio. En efecto, sea $x \in X$ y V un entorno de $f(x)$. Como todo conjunto en un e.m. es abierto, $f^{-1}(V)$ es un abierto, además contiene a x , de este modo es un entorno de x , lo que demuestra la condición ii) de la Proposición 1.4.8.

Ejemplo 1.4.16 Sea (X, d) un e.m. e Y un subespacio de X . La *inyección natural* $j : Y \rightarrow X$, definida por $j(x) = x$ es una función continua, como se puede corroborar fácilmente, quedando esta demostración como ejercicio.

Ejemplo 1.4.17 Las funciones constantes son continuas, es decir: sea (X, d) y (Z, d') dos e.m. y $f : X \rightarrow Z$ definida por $f(x) = a$, donde a es un punto de Z , entonces f es continua. La demostración queda como ejercicio.

Proposición 1.4.9 Sea $f : X \rightarrow Y$ continua en x . Supongamos que $x \in \bar{A}$ enton-

ces $f(x) \in \overline{f(A)}$.

Dem. Sea V un entorno de $f(x)$, hay que demostrar que $V \cap f(A) \neq \emptyset$. Pero, como f es continua en x , $f^{-1}(V)$ es un entorno de x . Ahora, ya que $x \in \overline{A}$, tenemos que $f^{-1}(V) \cap A \neq \emptyset$. Sea, pues, $y \in f^{-1}(V) \cap A$. Así, tenemos que $f(y) \in V \cap f(A)$. Luego $V \cap f(A) \neq \emptyset$. \square

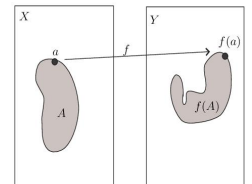
Ahora vamos a dar una serie de equivalencias a que una función sea globalmente continua.

Teorema 1.4.8 Sean (X, d) e (Y, d') e.m. y $f : X \rightarrow Y$ una función. Los siguientes enunciados son equivalentes:

- a) f es continua.
- b) Si $A \subset Y$ es un abierto de Y , entonces $f^{-1}(A)$ es abierto de X .
- c) Si $A \subset Y$ es un cerrado de Y , entonces $f^{-1}(A)$ es un cerrado de X .
- d) Para todo subconjunto $A \subset X$ se tiene que $f(\overline{A}) \subset \overline{f(A)}$.

Dem. La Proposición 1.4.9 en la página anterior establece a) \Rightarrow d). Veamos que d) \Rightarrow c). Sea A cerrado en Y y $A' = f^{-1}(A)$. Entonces

$$\begin{array}{ll} f(\overline{A'}) \subset \overline{f(A')} & \text{Hipótesis} \\ \subset \overline{A} & \text{definición de } A' \\ = A & A \text{ es cerrado} \end{array} \quad (1.13)$$



Interpretación del inciso d) del Teorema 1.4.8

Luego

$$\begin{array}{ll} \overline{A'} \subset f^{-1}(f(\overline{A'})) & \text{Propiedad de la función imagen} \\ \subset f^{-1}(A) & \text{Inclusión 1.13} \\ = A' & \text{Definición de } A' \end{array}$$

Por otro lado, como es sabido, $A' \subset \overline{A'}$, luego $\overline{A'} = A'$, lo que implica que A' es cerrado.

Ahora veamos que c) \Rightarrow b). Sea A abierto en Y . Entonces A^c es cerrado en Y . Entonces, por c), $f^{-1}(A^c)$ es cerrado en X . Pero, $f^{-1}(A^c) = (f^{-1}(A))^c$.

Por último veamos que b) \Rightarrow a). Sea $x \in X$ y V un entorno de $f(x)$, entonces $f(x) \in V^0$. Por hipótesis $f^{-1}(V^0)$ es un abierto que contiene a x . De este modo $f^{-1}(V^0)$ es un entorno de x . Como $f^{-1}(V^0) \subset f^{-1}(V)$ tenemos que $f^{-1}(V)$ es un entorno de x también. Lo que prueba que f es continua en x . \square

La propiedad d) tiene una interpretación gráfica. Expresa el hecho que si un punto a está “pegado” a un conjunto A (en el sentido que $a \in \overline{A}$) entonces $f(a)$ está “pegado” a $f(A)$, ver Figura ?? . Esto es así pues las funciones continuas aplican “puntos próximos” en “puntos próximos”, y, al decir que $a \in \overline{A}$ estamos diciendo que a “está próximo” al conjunto A .

Ahora veamos que la composición de funciones continuas es continua.

Proposición 1.4.10 Sean (X, d) , (Y, d') , (Z, d'') tres e.m., $f : X \rightarrow Y$ y $g : Y \rightarrow Z$ funciones tales que f es continua en $a \in X$ y g es continua en $f(a) \in Y$. Entonces $g \circ f : X \rightarrow Z$ es continua en a .

Dem. Sea W un entorno de $g(f(a))$. Como g es continua en $f(a)$ entonces $V := g^{-1}(W)$ es un entorno de $f(a)$. Luego, como f es continua en a , $f^{-1}(V) = f^{-1}(g^{-1}(W))$ es un entorno de a . Esto implica la tesis, pues $f^{-1}(g^{-1}(W)) = (g \circ f)^{-1}(W)$. \square

Corolario 1.4.2 Sea $f : X \rightarrow Y$ una función continua en a . Supongamos que $Z \subset X$ es un subespacio con $a \in Z$. Entonces la restricción de f al subespacio Z , con la métrica de subespacio, es continua en a .

Dem. La susodicha restricción es la composición de f con la inyección natural $j : Z \rightarrow X$. Por lo tanto el resultado sigue del hecho que la composición de funciones continuas es continua. \square

Otro concepto importante es el de función uniformemente continua.

Definición 1.4.17 Sea f una función entre dos e.m. (X, d) e (Y, d') . Diremos que f es *uniformemente continua* si para todo $\varepsilon > 0$ existe un $\delta > 0$ tal que $d'(f(x), f(y)) < \varepsilon$, si $d(x, y) < \delta$.

No es fácil entender la diferencia de esta definición con la que expresa que f es continua en cada punto de X . La diferencia es que el δ de esta definición es el mismo para todos los puntos de X . Mientras que decir que f es continua en cada punto de X implicaría, en principio, la existencia de un delta que puede depender del punto. Los siguientes ejemplos aclararan más esta definición.

Ejemplo 1.4.18 Las funciones constantes son uniformemente continuas. Dado un $\varepsilon > 0$ podemos tomar cualquier valor de δ que seguramente cumplirá la definición.

Ejemplo 1.4.19 Una función puede ser continua en todo punto y, sin embargo, no ser uniformemente continua, como muestra el siguiente ejemplo: Sea $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ definida por $f(x) = x^2$. Esta f es continua en todo punto y no uniformemente continua. En efecto, la diferencia $(a+h)^2 - a^2 = 2ah + h^2$ tiende a $+\infty$ si a tiende a $+\infty$. De modo que asegurar que $h < \delta$ no implica que las imágenes de $a+h$ y a estén cerca, no importando, para ello, cuán chico sea δ . Ver Figura ??.

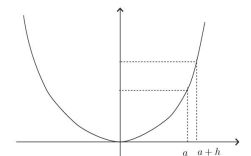
Si una función es uniformemente continua es continua en cada punto. La demostración de este hecho es bastante directa y simple.

Ejemplo 1.4.20 Sea (X, d) un e.m. y $A \subset X$. La función:

$$\begin{aligned} f : X &\longrightarrow \mathbb{R} \\ x &\longmapsto d(x, A). \end{aligned}$$

es uniformemente continua. Esto es consecuencia de la desigualdad probada en el Ejercicio 1.1.3 en la página 11, a saber:

$$|d(x, A) - d(y, A)| \leq d(x, y).$$



Función no uniformemente continua

1.4.1 Ejercicios

Ejercicio 1.4.22 Sean (X, d) , (Y, d') e.m., A y B subconjuntos de X tales que $A \cup B = X$.

- Sea $f : X \rightarrow Y$ una función tal que $f|_A$ y $f|_B$ son ambas continuas en $x \in A \cap B$, probar que f es continua en x .
- Dar un ejemplo de función tal que $f|_A$, $f|_B$ y $f|_{A \cap B}$ sean continuas pero f no lo sea.

^a $f|_A$ denota la restricción de f al conjunto A

Ejercicio 1.4.23 Sean $(X, d), (Y, d')$ e.m. y $f : X \rightarrow Y$ una función. Demostrar que son equivalentes:

- i) f es continua.
- ii) Para todo $B \subset Y: f^{-1}(B^0) \subset [f^{-1}(B)]^0$.
- iii) Para todo $B \subset Y: \overline{f^{-1}(B)} \subset f^{-1}(\overline{B})$.

Dar un ejemplo de función continua donde $\overline{f^{-1}(B)} \neq f^{-1}(\overline{B})$.

Ejercicio 1.4.24 Sean $(X, d), (Y, d')$ e.m. y $f, g : X \rightarrow Y$ funciones continuas. Demostrar que:

- i) El conjunto $\{x \in X | f(x) = g(x)\}$ es cerrado.
- ii) Si f y g coinciden en un conjunto denso entonces son iguales.

Ejercicio 1.4.25 Sean $(X, d), (Y, d')$ e.m.. Demostrar que son equivalentes

- i) Toda función $f : X \rightarrow Y$ es continua.
- ii) Todo punto de X es aislado^a.

^aPor abuso de lenguaje los e.m. con esta propiedad se denominan discretos

1.5 Homeomorfismos e isometrías

Definición 1.5.18 Sean $(X, d), (Y, d')$ dos e.m. y $f : X \rightarrow Y$ una función biyectiva. Diremos que f es un *homeomorfismo* si f y f^{-1} son ambas continuas. Dos e.m. tales que exista un homeomorfismo entre ellos se denominaran homeomorfos.

Ejemplo 1.5.21 Dos intervalos abiertos cualesquiera de \mathbb{R} son homeomorfos, uno puede construir una función lineal, que son homeomorfismos, que aplique uno en el otro. Mientras que un intervalo abierto cualquiera (a, b) es homeomorfo a \mathbb{R} . Un homeomorfismo entre ambos es la función:

$$f : (a, b) \longrightarrow \mathbb{R}$$

$$x \longmapsto \tan\left(\pi \frac{2x - (a + b)}{2(b - a)}\right)$$

Ejemplo 1.5.22 Un intervalo cerrado ya no es homeomorfo a \mathbb{R} , esto lo demostraremos más adelante. No obstante podemos definir la *recta real extendida* que será homeomorfa a los intervalos cerrados. Más precisamente, sea $f : \mathbb{R} \rightarrow (-1, 1)$ la función $f(x) = x/(1 + |x|)$. No es difícil demostrar que f es biyectiva, de hecho analizando esta función con las herramientas aprendidas en Cálculo I vemos que tiene la forma de la Figura ?? en la página ?? . Definamos el conjunto $\overline{\mathbb{R}}$, al que llamaremos *recta extendida*, como la unión

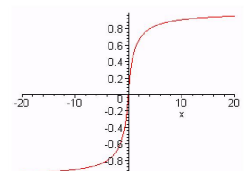


Gráfico de la función
 $f(x) = x/(1 + |x|)$

de \mathbb{R} con dos nuevos elementos, a los que llamaremos $-\infty$ y $+\infty$. Ahora extendemos f de \mathbb{R} al $[-1, 1]$ por $f(+\infty) = 1$ y $f(-\infty) = -1$. Definimos la función $d : \overline{\mathbb{R}} \times \overline{\mathbb{R}} \rightarrow \mathbb{R}$ por:

$$d(x, y) = |f(x) - f(y)|. \quad (1.14)$$

La función d es una métrica en $\overline{\mathbb{R}}$ (la sencilla demostración la desarrollaremos en clase). Con esta métrica el conjunto $\overline{\mathbb{R}}$ es acotado, de hecho $\delta(\overline{\mathbb{R}}) = 2$. Además la función f resulta un homeomorfismo de $\overline{\mathbb{R}}$ en $[-1, 1]$ (este último con la métrica del módulo). En efecto, en virtud de la ecuación 1.14, dado $\varepsilon > 0$ basta elegir $\delta = \varepsilon$ para verificar que f es uniformemente continua. Si llamamos g a la inversa de f y reemplazamos x e y en 1.14 por $g(t)$ y $g(s)$ respectivamente, comprobamos que

$$d(g(t), g(s)) = |t - s|. \quad (1.15)$$

Lo cual implica que g es uniformemente continua, por razones similares a las que invocamos para f . En particular f y su inversa son continuas, de modo que f es un homeomorfismo.

En el ejemplo anterior las funciones f y g tienen una propiedad más fuerte que la de ser homeomorfismos, esta propiedad la definimos a continuación.

Definición 1.5.19 Sean (X, d) , (Y, d') dos e.m. y $f : X \rightarrow Y$ una función biyectiva. Se dirá que f es una *isometría* si para todos x e y en X se tiene que:

$$d'(f(x), f(y)) = d(x, y).$$

Si, entre dos e.m. existe una isometría diremos que los espacios son *isométricos*.

Una isometría es un homeomorfismo, la idea central de la demostración de esta afirmación está en el ejemplo anterior. Igual que en aquel ejemplo, hay que demostrar que la inversa de una isometría es, a la vez, una isometría.

Proposición 1.5.11 Sean (X, d) , (Y, d') dos e.m. y $f : X \rightarrow Y$ una función biyectiva con inversa g . Entonces son equivalentes:

- i) f es un homeomorfismo.
- ii) $A \subset X$ es abierto si, y solo si, $f(A)$ es abierto.

Dem. i) \Rightarrow ii). Sea $A \subset X$. Supongamos, en primer lugar, que A es abierto. Como $g : Y \rightarrow X$ es continua, $g^{-1}(A) = f(A)$ es abierto. Supongamos, ahora, que $f(A)$ es abierto. Como f es continua, $f^{-1}(f(A)) = g(f(A)) = A$ es abierto. Esto concluye la demostración de la primera implicación.

ii) \Rightarrow i). Tenemos que demostrar que f y g son continuas. Veamos, primero, que f es continua. Sea B un abierto de Y , hay que demostrar que $f^{-1}(B) = g(B)$ es un abierto de X . Pero $B = f(g(B))$ y B es abierto, entonces, por ii), $g(B)$ es abierto. Veamos, ahora, que g es continua. Sea A abierto en X . Luego, por ii), $g^{-1}(A) = f(A)$ es abierto en Y , por lo cual, g es continua. \square

Este teorema nos dice que si dos espacios son homeomorfos, entonces existe una correspondencia de los abiertos de uno con los del otro espacio.

El conjunto formado por todos los conjuntos abiertos, se denomina *topología*. Brevemente, digamos que un *espacio topológico* es un par (X, τ) , donde $\tau \subset \mathcal{P}(X)$ ³, que satisface los siguientes axiomas:

- 1) $\emptyset, X \in \tau$
- 2) Si $G_i \in \tau$, para $i \in I$, entonces $\bigcup_{i \in I} G_i \in \tau$.

³ $\mathcal{P}(X)$ es el conjunto de partes de X , es decir τ es un conjunto cuyos elementos son subconjuntos de X

3) Si $G_i \in \tau$, para $i \in I$, e I es finito, entonces $\bigcap_{i \in I} G_i \in \tau$.

En un espacio topológico uno puede construir las nociones, que hemos construido para e.m., por ejemplo conjunto cerrado, interior, clausura, entorno, función continua y espacio separable. Por tanto, estas propiedades se denominan topológicas. Las propiedades topológicas son invariantes por homeomorfismos, por ejemplo si un espacio es separable, cualquier homeomorfo a él también lo es. Algunas propiedades no son topológicas, por ejemplo que una función sea uniformemente continua, puesto que para definir este concepto necesitamos de una métrica.

Un mismo conjunto X , puede tener dos métricas distintas, por ejemplo en \mathbb{R} tenemos la métrica euclídea y la discreta. Podemos plantearnos que estas métricas den origen a una misma topología, si esto sucede diremos que las dos *métricas son equivalentes*.

1.5.1 Ejercicios

Ejercicio 1.5.26 Sean (X, d) , (Y, d') e.m. y $f : X \rightarrow Y$ una función biyectiva. Demostrar que f es un homeomorfismo si, y solo si, para todo $A \subset X$ tenemos que $f(\overline{A}) = \overline{f(A)}$.

Ejercicio 1.5.27 Demostrar:

- i) que las métricas sobre \mathbb{R}^n definidas en los Ejemplos 1.1.2 en la página 2, ?? en la página ?? y ?? en la página ?? son todas equivalentes.
- ii) que las distancias d , d_1 y d_2 del Ejercicio 1.1.4 en la página 11 son equivalentes.
- iii) Dados dos topologías τ_1 y τ_2 sobre el mismo espacio X decimos que τ_1 es más fina que τ_2 si $\tau_2 \subset \tau_1$. Demostrar que, sobre $C([0, 1])$, la topología que genera la métrica del Ejemplo 1.1.4 en la página 2 es más fina que la topología que genera la métrica del Ejemplo 1.1.4 en la página 2 es más fina que la del Ejemplo 1.1.5 en la página 3.

1.6 Completitud

Una propiedad importante de los espacios métricos es la completitud. En esta unidad introducimos esta propiedad e indagamos algunas de sus consecuencias.

1.6.1 Sucesiones

Definición 1.6.20 Una *sucesión* en un e.m. (X, d) es una función $f : \mathbb{N} \rightarrow X$.

Esta es la definición formal de sucesión, no obstante cuando se trabaja con sucesiones no se hace alusión explícita a la función f de la definición. Normalmente una sucesión se introduce con el símbolo $\{a_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ o, brevemente, $\{a_n\}$, asumiendo que los índices n son naturales. Claro está que, implícitamente, estos símbolos conllevan la función f . Esta es la función tal que $f(n) = a_n$.

Definición 1.6.21 Sea $\{a_n\}$ una sucesión en el e.m. (X, d) . Diremos que esta sucesión *converge* al punto $a \in X$ (denotaremos esto por $a_n \rightarrow a$) si, y solo si, para todo entorno U de a existe un $n_0 = n_0(U)$ tal que cuando $n \geq n_0$ se tiene que $a_n \in U$. Sintéticamente, dado cualquier entorno, salvo posiblemente una cantidad

finita de términos de la sucesión todos los términos restantes están incluidos en el entorno, ver la Figura ?? en la página ??

La convergencia es una propiedad topológica. Confiamos en que el alumno tiene muchos ejemplos de sucesiones convergentes en \mathbb{R} , esto fué visto en Cálculo I. Vamos a ver que sucede en otros espacios métricos.

Ejemplo 1.6.23 En un e.m. discreto (X, d) si una sucesión $\{a_n\}$ converge al punto a , entonces a partir de un n_0 en adelante se tiene que $a_n = a_{n_0}$. En efecto, esto es consecuencia de considerar el siguiente entorno: $U = B(a, 1/2) = \{a\}$.

Ejemplo 1.6.24 Consideremos el e.m. $(C([0, 1]), d)$, donde $C([0, 1])$ representa al conjunto de funciones continuas $f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ y d es la métrica definida en el Ejemplo 1.1.5 en la página 3. Consideremos las funciones definidas por:

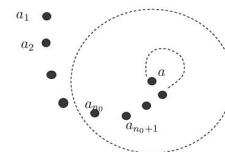
$$f(x) = \begin{cases} nx, & \text{si } 0 \leq x \leq \frac{1}{n}; \\ 2 - nx, & \text{si } \frac{1}{n} \leq x \leq \frac{2}{n}; \\ 0, & \text{si } \frac{2}{n} \leq x \leq 1. \end{cases}$$

En la Figura ?? en la página ??, se pueden observar los gráficos de estas funciones. Es un ejercicio de Cálculo I demostrar que $f_n \rightarrow 0$ con la métrica propuesta. Sin embargo, sobre $C([0, 1])$ tenemos definida otra métrica, a saber: la del Ejemplo 1.1.4 en la página 2. Con esta métrica la sucesión f_n no converge a ninguna función.

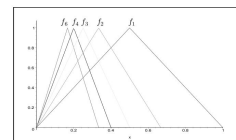
Es posible caracterizar algunos de los conceptos, que ya hemos visto, en términos de sucesiones. Por ejemplo, el concepto de clausura y continuidad.

Proposición 1.6.12 Sea (X, d) un e.m. y $A \subset X$. Entonces $a \in \overline{A}$ si, y solo si, existe una sucesión $a_n \in A$ tal que $a_n \rightarrow a$.

Dem. Supongamos que $a \in \overline{A}$, entonces, para todo $n \in \mathbb{N}$ se tiene que $B(a, 1/n) \cap A \neq \emptyset$. Sea, pues, $a_n \in B(a, 1/n) \cap A$. Se puede ver, sin dificultad, que $a_n \rightarrow a$. Recíprocamente, supongamos que existe la sucesión $\{a_n\}$. Si U es un entorno arbitrario de a , entonces, puesto que $a \in \overline{A}$, tenemos que, para ciertos n , $a_n \in U$, luego, estos a_n , están en la intersección de U con A , lo que implica que esta es no vacía. Eso prueba que $a \in \overline{A}$. \square



Definición 1.6.21 en la página anterior



Funciones del Ejemplo 1.6.24

1.6.2 Sucesiones de Cauchy, espacios métricos completos

Definición 1.6.22

- Dada una sucesión $\{a_n\}$ en un e.m. (X, d) , diremos que $\{a_n\}$ es una *sucesión de Cauchy* si: para todo $\varepsilon > 0$ existe un $n_0 = n_0(\varepsilon)^a$ tal que para $n, m \geq n_0$ tenemos que $d(a_n, a_m) < \varepsilon$. En otras palabras, para valores grandes de n los términos a_n están cerca entre sí.
- Un e.m. se dirá *completo* si, y solo si, toda sucesión de Cauchy en él es convergente.

^aCon $n_0 = n_0(\varepsilon)$ queremos decir que el número n_0 depende de ε pero que normalmente no usaremos la notación $n_0(\varepsilon)$ sino, simplemente, n_0

Como acabamos de decir, en un e.m. completo toda sucesión de Cauchy converge. La recíproca de esta afirmación es siempre cierta, es decir en cualquier e.m. toda sucesión convergente es de Cauchy. En efecto, sea $\{a_n\}$ una sucesión convergente en (X, d) al punto a y sea $\varepsilon > 0$. Existe un $N = N(\varepsilon)$ tal que para $n > N$ se tiene que

$$d(a_n, a) < \frac{\varepsilon}{2}.$$

Luego, para $n, m > N$ y por la desigualdad triángular, tenemos que

$$d(a_n, a_m) \leq d(a_n, a) + d(a, a_m) < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon.$$

Esto prueba que la sucesión es de Cauchy, como queríamos.

Un ejemplo importante de e.m. completo es \mathbb{R} . Esta propiedad de \mathbb{R} es enunciada, prácticamente, como un axioma. Hablaremos, mas no sea brevemente, de los “fundamentos” de los números reales en el apéndice al final de esta unidad, ver Sección ?? en la página ?? . Sabiendo que \mathbb{R} con la métrica del módulo es completo podemos demostrar la completitud de otros e.m., como veremos más abajo. Antes de ver esto demostremos que toda sucesión convergente es de Cauchy

Ejemplo 1.6.25 \mathbb{R}^n con la métrica euclídea es un e.m. completo.⁴ Vamos a demostrar esta afirmación. Denotemos por letras en negritas $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$, etc n -uplas en \mathbb{R}^n , es decir $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ con $x_i \in \mathbb{R}, i = 1, \dots, n$. Consideremos una sucesión de Cauchy $\{\mathbf{x}_j\}_{j \in \mathbb{N}}$ en \mathbb{R}^n . Esto nos determina n sucesiones en \mathbb{R} , puesto que $\mathbf{x}_j = (x_1^j, \dots, x_n^j)$. Veamos que, para cada i , $\{x_i^j\}_{j \in \mathbb{N}}$ es una sucesión de Cauchy en \mathbb{R} . Se tiene que:

$$|x_i^j - x_i^k| \leq \sqrt{\sum_{s=1}^n (x_s^j - x_s^k)^2} \leq d(\mathbf{x}_j, \mathbf{x}_k).$$

Como el último miembro se puede hacer tan chico como queramos, puesto que $\{\mathbf{x}_j\}$ es de Cauchy, podemos conseguir lo mismo para el primer miembro, esto es $\{x_i^j\}$ es de Cauchy. Así, como \mathbb{R} es completo, existe un x_i , para $i = 1, \dots, n$ tal que $x_i^j \rightarrow x_i$, para $j \rightarrow \infty$. Definamos, pues, $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ y veamos que $\mathbf{x}_j \rightarrow \mathbf{x}$. Sea $\varepsilon > 0$, para cada $i = 1, \dots, n$ podemos hallar un $j(\varepsilon, i)$, es decir j depende de ε y de i , tal que para $j \geq j(\varepsilon, i)$ tenemos que:

$$|x_i^j - x_i| < \frac{\varepsilon}{\sqrt{n}}.$$

Así, si:

$$j \geq \max_{1 \leq i \leq n} j(\varepsilon, i)$$

entonces

$$d(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i^j - x_i)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon^2}{n}} = \varepsilon,$$

lo que demuestra que $\mathbf{x}_j \rightarrow \mathbf{x}$, como queríamos.

Ejemplo 1.6.26 El e.m. $(C([0, 1]), d)$, con d como en el Ejemplo 1.6.24 en la página anterior, no es completo. Consideremos las siguientes funciones, para $n \geq 2$:

$$f_n(x) := \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq x \leq \frac{1}{2}; \\ -nx + \frac{n+2}{2n}, & \text{si } \frac{1}{2} \leq x \leq \frac{1}{2} + \frac{1}{n}; \\ 0, & \text{si } \frac{1}{2} \leq x \leq 1. \end{cases}$$

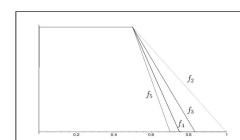
en la Figura ?? en la página ?? graficamos estas funciones.

No es difícil convencerse que esta es una sucesión de Cauchy, puesto que, para $j, k \geq n$ tenemos que:

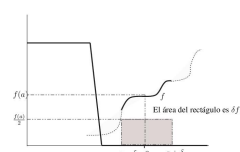
$$d(f_j, f_k) = \frac{1}{2} \left| \frac{1}{j} - \frac{1}{k} \right| \leq \frac{1}{n} \rightarrow 0 \quad \text{cuando } n \rightarrow \infty.$$

Sin embargo estas funciones no convergen a ninguna función en $C([0, 1])$. Para ver esto, supongamos que, por el contrario, existe $f \in C([0, 1])$ tal que $f_n \rightarrow f$. Vamos a demostrar que, necesariamente, f debe valer 1 en el intervalo $[0, 1/2]$ y debe valer 0 en el intervalo $(1/2, 1)$, por tal motivo no podría ser continua contradiciendo las hipótesis.

⁴ Observar que, en virtud del Ejercicio 1.6.39 en la página 29 \mathbb{R}^n con cualquier métrica equivalente a la euclídea también resultará completo



Funciones del Ejemplo 1.6.26



Construcción de la demostración en el Ejemplo 1.6.26

Vamos a demostrar solo que f es 0 en $(1/2, 1)$, la otra parte es similar y aun más facil. Supongamos que exista $1/2 < a < 1$ tal que $f(a) \neq 0$, podemos suponer que $f(a) > 0$. Elijamos $\delta_1 > 0$ suficientemente pequeño de modo que $1/2 < a - \delta_1$ y elijamos $\delta_2 > 0$ suficientemente pequeño de modo tal que $f(x) > f(a)/2$ para $x \in (a - \delta_2, a + \delta_2)$ (esto es posible pues f es continua en a). Ahora, el número $\delta := \min\{\delta_1, \delta_2\}$ satisface las dos propiedades anteriores simultaneamente. Podemos encontrar un n_0 suficientemente grande para que $1/2 + 1/n < a - \delta$, cuando $n > n_0$, esto implica que f_n es idénticamente cero en el intervalo $(a - \delta, a + \delta)$, ver la Figura ?? en la página ??.

Juntando todas las propiedades vistas en el párrafo anterior, deducimos que, para $n > n_0$,

$$d(f_n, f) = \int_0^1 |f_n - f| dx \geq \int_{a-\delta}^{a+\delta} |f_n - f| dx \geq \delta f(a) > 0.$$

De modo que f_n no converge a f , contradiciendo nuestras suposiciones.

Ahora veremos que subespacios, de un e.m. completo, son, a su vez, completos.

Proposición 1.6.13 Sea (X, d) un e.m. completo e $Y \subset X$. Son equivalentes:

- i) (Y, d) es un subespacio completo.
- ii) Y es cerrado en X .

1.6.3 Teorema de Cantor

Teorema 1.6.9 [Teorema de la intersección de Cantor.] Sea (X, d) un espacio métrico completo. Sea $\{F_n\}_1^\infty$ una secuencia decreciente de conjuntos cerrados en X . Es decir

$$F_1 \supset F_2 \supset \dots \supset F_n \supset \dots$$

Supongamos que:

$$\delta(F_n) \rightarrow 0 \text{ as } n \rightarrow \infty$$

Entonces:

$$\exists x \in X : \bigcap_{n=1}^{\infty} F_n = \{x\}.$$

Demostración. Primero demostramos que $\bigcap_{n=1}^{\infty} F_n$ tiene como máximo un elemento. De hecho, sea $x_0, \tilde{x}_0 \in \bigcap_{n=1}^{\infty} F_n$. Entonces $x_0, \tilde{x}_0 \in F_n$ para todo $n \in \mathbb{N}$ y por lo tanto

$$d(x_0, \tilde{x}_0) \leq \delta(F_n)$$

para cualquier $n \in \mathbb{N}$. Por lo tanto, tomando límite cuando $n \rightarrow \infty$ deducimos $d(x_0, \tilde{x}_0) = 0$, por lo cual $x_0 = \tilde{x}_0$. De allí que hay a lo sumo un elemento en la intersección.

Ahora probamos que $\bigcap_{n=1}^{\infty} F_n$ tiene al menos un elemento. Para cualquier $n \in \mathbb{N}$, elijamos algún elemento $x_n \in F_n$. Probamos que $\{x_n\}_1^\infty$ es una sucesión de Cauchy. De hecho, para cualquier $\varepsilon > 0$, elijamos $N \in \mathbb{N}$ tal que $\text{diam}(F_N) < \varepsilon$. Entonces, para cualquier $n, m \geq N$, tenemos que $x_n \in F_n \subseteq F_N$ y $x_m \in F_m \subseteq F_N$, por lo que

$$d(x_n, x_m) \leq \delta(F_N) < \varepsilon$$

Por lo tanto, $(x_n)_1^\infty$ es una sucesión de Cauchy. Como (X, d) es completo, se sigue que existe $x_0 \in X$ tal que $x_n \rightarrow x_0$ como $n \rightarrow \infty$. Afirmamos que $x_0 \in F_k$ para todo $k \in \mathbb{N}$. De hecho, para cualquier $k \in \mathbb{N}$, tenemos que

$$x_k, x_{k+1}, x_{k+2}, \dots \in F_k$$

y dado que F_k es cerrado y $x_n \rightarrow x_0$ como $n \rightarrow \infty$, se sigue que $x_0 \in F_k$. Por lo tanto, $x_0 \in \bigcap_{k \in \mathbb{N}} F_k$. Esto completa la prueba. \square

1.6.4 Teorema de Baire

Definición 1.6.23 [Conjuntos nunca densos, categorías de Baire] Sea (X, d) un espacio métrico.

1. Se dice que un subconjunto $Y \subset X$ es *nunca denso* o *magro* cuando $(\bar{Y})^\circ = \emptyset$.
2. Se dice que un subconjunto $Y \subset X$ es de *primera categoría* si es unión numerable de subconjuntos nunca densos.
3. Los subconjuntos que no son de primera categoría se denominan de *segunda categoría*.

Observación: i) Puesto que $\overline{(\bar{Y})^c} = Y^{c \circ c \circ c \circ c} = Y^{c \circ c \circ c} = (\bar{Y}^\circ)^c$. Se concluye que Y es magro si y sólo si $(\bar{Y})^c$ es denso.

ii) El concepto de nunca denso no es lo mismo que lo contrario a denso. De hecho son conceptos bastantes diferentes. Por ejemplo un intervalo (a, b) de \mathbb{R} no es denso y tampoco nunca denso. La implicación contraria es verdadera, esto es si un conjunto es nunca denso entonces no es denso.

iii) Un subconjunto de un conjunto nunca denso resulta nunca denso. La misma aseveración vale con conjuntos de primera categoría.

Ejercicio 1.6.28 Demostrar que el único conjunto magro en un espacio métrico discreto es \emptyset .

Ejercicio 1.6.29 Demostrar que \mathbb{Q} es de primera categoría.

Teorema 1.6.10 [Baire] Todo espacio métrico completo es de segunda categoría.

Demostración. Suponemos que (X, d) es un espacio métrico completo y

$$X = \bigcup_{n=1}^{\infty} E_n \quad (1.16)$$

donde cada uno de los E_n magro, o equivalentemente $V_n := (\bar{E}_n)^c$ es un abierto denso. Tomando complementos en la identidad (1.16) deducimos que $\emptyset = \bigcap_{n=1}^{\infty} E_n^c$. Y como $V_n \subset E_n^c$ deducimos

$$\emptyset = \bigcap_{n=1}^{\infty} V_n^c.$$

Probaremos que el conjunto del segundo miembro de la igualdad anterior es no vacío y así arribaremos a una contradicción. De hecho, vamos todavía más fuerte, esto es que $\bigcap_{n=1}^{\infty} V_n^c$ es un conjunto denso. Esto es un resultado que merece destacarse. *En un espacio métrico completo la intersección de una cantidad numerable conjuntos abiertos y densos es un conjunto denso.*

Para demostrar que $\bigcap_{n=1}^{\infty} V_n^c$ es denso es suficiente demostrar que:

$$x_0 \in X \text{ y } r > 0 \Rightarrow B(x_0, r) \cap \left(\bigcap_{n=1}^{\infty} V_n^c \right) \neq \emptyset. \quad (1.17)$$

Observación: Vamos a usar repetidamente la siguiente propiedad: Si V es abierto y denso y G es abierto entonces $G \cap V$ es abierto y no vacío, por ende existe $r > 0$ y $x \in G \cap V$ con $B'(x, r) \subset G \cap V$

Por la observación existe $x_1 \in X$ y $r_1 > 0$ tal que

$$B'(x_1, r_1) \subset V_1 \cap B(x_0, r).$$

Nuevamente por la observación existe $x_2 \in X$ y $r_2 > 0$ tal que

$$B'(x_2, r_2) \subset V_2 \cap B(x_1, r_1)$$

Continuando de esta manera, usando el hecho de que para cada $n \in \mathbb{N}$, V_n es abierto y denso y que $B(x_{n-1}, r_{n-1})$ es abierto, obtenemos $x_n \in X$ y $r_n > 0$ tal que

$$B'(x_n, r_n) \subset V_n \cap B(x_{n-1}, r_{n-1})$$

Además, en cada paso de esta construcción, podemos elegir r_n , achicándolo si fuese necesario, de modo que $0 < r_n \leq 1/n$.

Se tiene que

$$B'(x_1, r_1) \supset B'(x_2, r_2) \supset \cdots \supset B'(x_n, r_n) \supset \cdots$$

y

$$\text{diam}(B'(x_n, r_n)) \longrightarrow 0 \text{ cuando } n \rightarrow \infty$$

de modo que, por el Teorema 1.6.9, tenemos que existe $x \in X$ tal que

$$\bigcap_{n=1}^{\infty} B'(x_n, r_n) = \{x\}$$

Notar que por lo previamente probado

$$x \in B(x_0, r) \cap \left(\bigcap_{n=1}^{\infty} V_n \right).$$

Por lo tanto se verifica (1.17). □

1.6.5 Ejercicios

Ejercicio 1.6.30 Consideremos el conjunto $C([0, 1])$ donde tenemos definidas las dos métricas d_1 y d_2 de los Ejemplos 1.3 en la página 2 y 1.4 en la página 3 respectivamente. Determinar si las siguientes sucesiones son convergentes con estas métricas y si son de Cauchy.

i) $f_n(x) := \frac{1}{n} \sin(nx)$.

ii) $f_n(x) := x^n$.

iii) $f_n(x) := nx^n$.

Ejercicio 1.6.31 Con la misma notación del ejercicio anterior demostrar que si $f_n \rightarrow f$ con la métrica d_1 entonces lo mismo ocurre con la métrica d_2 .

Ejercicio 1.6.32 Sean (X, d) e (Y, d') dos e.m. y $f : X \rightarrow Y$ un homeomorfismo. Demostrar que la sucesión $\{a_n\}$ es convergente en X si, y solo si, $f(a_n)$ es convergente en Y .

Ejercicio 1.6.33 Sea (X, d) un e.m., $a \in A$ y $A \subset X$. Demostrar que existe un sucesión $\{a_n\}$, con $a_n \in A$, para todo n , y:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} d(a, a_n) = d(a, A).$$

Ejercicio 1.6.34 Sea $A \subset \mathbb{R}$ un conjunto acotado superiormente. Demostrar que existe una sucesión $\{a_n\}$, con $a_n \in A$, para todo n , y además:

$$\sup A = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n.$$

Ejercicio 1.6.35 Demostrar que $(C([0, 1]), d_1)$, con d_1 como en el Ejercicio 1.6.30, es un e.m. completo.

Ejercicio 1.6.36 Demostrar que un e.m. con una cantidad finita de elementos es completo.

Ejercicio 1.6.37 Demostrar que una sucesión de Cauchy es acotada.

Ejercicio 1.6.38 Sea $\{a_n\}$ una sucesión en un e.m. (X, d) , demostrar que cualquiera de las dos condiciones implica que $\{a_n\}$ es de Cauchy.

i) $d(a_n, a_{n+1}) \leq \alpha^n$, con $0 < \alpha < 1$.

ii) La siguiente serie es convergente:

$$\sum_{n=1}^{\infty} d(a_n, a_{n+1}).$$

Ejercicio 1.6.39 Sean d y d' dos métricas uniformemente equivalentes sobre el mismo espacio X . Demostrar que (X, d) es completo si, y solo si, (X, d') es completo.

Ejercicio 1.6.40 Sea $f : X \rightarrow Y$ una función uniformemente continua entre dos e.m.. Demostrar que si $\{a_n\}$ es de Cauchy en X entonces $\{f(a_n)\}$ es de Cauchy en Y . Dar un contraejemplo a la afirmación anterior suponiendo, solo, que f es continua. *Ayuda:* Considerar la recta extendida.

Ejercicio 1.6.41 Demostrar que el axioma de completitud de \mathbb{R} dado, se puede sustituir por cualquiera de los siguientes:

- i) Toda sucesión de Cauchy en \mathbb{R} converge.
- ii) *Principio de Encajes de Intervalos.* Sea $\{I_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ una sucesión de intervalos cerrados tales que $I_{n+1} \subset I_n$, para todo n , entonces $\bigcap_{n \in \mathbb{N}} I_n \neq \emptyset$.

1.7 Compacidad

Es quizás con la noción de conjunto compacto donde encontraremos las diferencias más grandes entre la topología de \mathbb{R}^n y la de un espacio métrico arbitrario. En particular, ya no será válida la carectización de compacto como cerrado y acotado. Para obtener una caracterización necesitaremos un concepto más fuerte que la acotación, este será el de conjunto **totalmente acotado** y, a la vez, un concepto más fuerte que el de conjunto cerrado y en este caso usaremos la de conjunto completo.

Es interesante hacer notar que, en topología, interesan aquellas propiedades que se preservan por homeomorfismos. En este sentido vemos que la noción de conjunto cerrado acotado no se preserva por este tipo de aplicaciones (claro está, los espacios métricos involucrados deberían ser distintos que \mathbb{R}^n con la métrica euclídea). Por ejemplo, como ya hemos visto, la identidad es un homeomorfismo de (\mathbb{R}^n, d) , con d la métrica euclídea, en (\mathbb{R}^n, d_1) , con

$$d_1(x, y) = \frac{d(x, y)}{1 + d(x, y)}.$$

Ahora bien, como $0 \leq d_1 < 1$ cualquier conjunto de \mathbb{R}^n tiene diámetro, respecto a d_1 menor o igual a 1 y, por ende, cualquier conjunto es acotado. Sin embargo, no todo conjunto es acotado respecto a la métrica euclídea. Por otra parte \mathbb{R}^n es cerrado en ambas métricas, pues es el conjunto total. Vemos así que el concepto de conjunto cerrado y acotado no necesariamente se preserva por homeomorfismos lo que relativiza su importancia.

Definición 1.7.24 Diremos que un conjunto A de un e.m. (X, d) es totalmente acotado si para cada $\varepsilon > 0$ existe una cantidad finita de conjuntos de diámetro menor que ε cuya unión contiene a A . En otras palabras existen conjuntos $A_i, i = 1, \dots, n$, con $\delta(A_i) < \varepsilon$ que satisfacen:

$$A \subset \bigcup_{i=1}^n A_i.$$

Ejercicio 1.7.42 Demostrar que un subconjunto de un conjunto totalmente acotado es totalmente acotado.

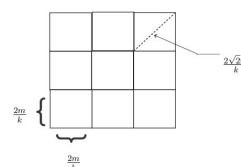
Veamos algunos ejemplos de conjuntos totalmente acotados y de conjuntos que no lo son.

Ejemplo 1.7.27 Cualquier intervalo acotado de \mathbb{R} es totalmente acotado. Para justificar esta aseveración, tomemos $\varepsilon > 0$ y un intervalo cualquiera de extremos a y b . Elijamos n suficientemente grande para que $1/n < \varepsilon$. Entonces los conjuntos

$$I_k := \left[\frac{k}{n}, \frac{k+1}{n} \right], \quad k = 0, \dots, n-1,$$

satisfacen la definición.

Ejemplo 1.7.28 Cualquier conjunto acotado en el espacio euclídeo \mathbb{R}^n es totalmente acotado. Sea $A \subset \mathbb{R}^n$ un conjunto acotado, entonces A está contenido en un cubo de la



forma $C := [-m, m] \times \cdots \times [-m, m] = [-m, m]^n$. En virtud del Ejercicio 1.7.49 en la página 35 es suficiente demostrar que C es totalmente acotado. Sea $\varepsilon > 0$. Tomemos k suficientemente grande para que

$$\frac{2\sqrt{nm}}{\varepsilon} < k \quad (1.18)$$

Ahora, partimos cada intervalo $[-m, m]$ en k subintervalos de la misma longitud $1/k$.

Como puede observarse en la Figura ??, nos quedan determinados k^n cubos que cubren el cubo C . Cada uno de estos cubos más chicos tiene diámetro $2\sqrt{nm}/k$, por consiguiente, por la desigualdad 1.18, el diámetro de ellos es menor que ε .

No es cierto, en general, que todo conjunto acotado en un e.m. sea totalmente acotado. Los siguientes ejemplos muestran esto.

Ejemplo 1.7.29 Sea (X, d) un e.m. discreto con X infinito. El conjunto X es acotado, de hecho $\delta(X) = 1$; sin embargo no podemos cubrir X con conjuntos de diámetro menor que $1/2$ (cualquier número menor que 1 serviría). Esto ocurre debido a que si un conjunto en un e.m. discreto tiene más de un elemento entonces su diámetro es 1. Así, si cubrimos X con una cantidad finita de conjuntos, alguno de los conjuntos del cubrimiento necesariamente tiene más de un elemento, de lo contrario X sería finito, por consiguiente el diámetro de este conjunto es 1 y no puede ser menor que $1/2$.

Ejemplo 1.7.30 En $C([0, 1])$, con la métrica del Ejemplo 1.1.4 en la página 2, la bola cerrada $K(0, 1)$ (0 denota la función que es constantemente igual a 0) no es un conjunto totalmente acotado. Para ver esto definimos la siguiente función:

$$f(x) := \begin{cases} 4(x - \frac{1}{2}), & \text{si } \frac{1}{2} \leq x \leq \frac{3}{4}; \\ -4(x - 1), & \text{si } \frac{3}{4} \leq x \leq 1; \\ 0, & \text{para los restantes } x; \end{cases}$$

y la siguiente sucesión de funciones $f_n(x) := f(2^n x)$. En la Figura ?? puede verse las gráficas de algunas de las funciones de la sucesión.

Puede demostrarse que la distancia de cualquiera de las funciones de la sucesión a otra es igual a 1 y que $f_n \in K(0, 1)$. Sea $C := \{f_n : n \in \mathbb{N}\}$, observemos que como subespacio C resulta ser un e.m. discreto, así, por el Ejemplo anterior y el Ejercicio 1.7.49 en la página 35, $\overline{B(0, 1)}$ no puede ser totalmente acotado.

Ejemplo 1.7.31 Hay una interesante conexión de la total acotación con la dimensión. Para introducirla, veamos cuantas bolas abiertas de radio $1/2$, en \mathbb{R}^n con la métrica euclídea, se necesitan, al menos, para cubrir la bola cerrada $K(0, 1)$. Denotemos por e_j los vectores canónicos

$$e_j := (0, \dots, 1, \dots, 0),$$

donde el 1 está en el lugar j . Notesé que $e_j \in K(0, 1)$ y que:

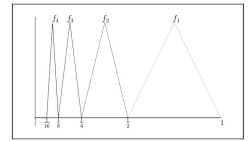
$$d(e_j, e_i) = \sqrt{2} \quad i \neq j.$$

De modo que, si $i \neq j$ entonces e_i y e_j no pueden estar en una misma bola de radio $1/2$. De lo contrario, si $e_i, e_j \in B(x, 1/2)$, entonces

$$d(e_i, e_j) \leq d(e_i, x) + d(x, e_j) < 1 < \sqrt{2},$$

que es una contradicción. De esta manera si cubrimos la bola cerrada $K(0, 1)$ por bolas abiertas de radio $1/2$ necesitaremos, al menos, n de estas bolas. Es decir, la cantidad de estas bolas crece cuando aumenta la dimensión n . Esta observación nos lleva a conjeturar que si buscamos un espacio vectorial de dimensión infinita⁵ tenemos chances de construir conjuntos acotados, en particular la bola $K(0, 1)$, que no son totalmente acotados.

Ejercicio 1.7.43 Demostrar que en l_2 la bola cerrada $K(0, 1)$ no es totalmente acotada.



Funciones del Ejemplo 1.7.30

⁵Esto significa que no tiene una base finita

Recordemos que, en un e.m. (X, d) , una familia de conjuntos abiertos $\{U_i\}_{i \in I}$ es un cubrimiento por abiertos de $A \subset X$ si

$$A \subset \bigcup_{i \in I} U_i.$$

Definición 1.7.25 Un subconjunto A de un e.m. (X, d) se dirá **compacto** si, y solo si, todo cubrimiento por abiertos de A tiene un subcubrimiento finito. Es decir, si $\{U_i\}_{i \in I}$ es un cubrimiento de A , existe un conjunto finito $F \subset I$ tal que $\{U_i\}_{i \in F}$ es un cubrimiento de A .

Teorema 1.7.11 (Caracterización de compacidad en espacios métricos) Sea (X, d) un espacio métrico. Entonces son equivalentes:

1. X es compacto;
2. X es totalmente acotado y completo.
3. Toda sucesión en X tiene una subsucesión convergente.

Dem. Veamos que $1 \Rightarrow 3$. Por el absurdo supongamos que existe una sucesión $\{a_n\}$ en X que no tiene ninguna subsucesión convergente. Definamos Γ como la colección de todos los conjuntos abiertos G de X tales que G tiene una cantidad finita de elementos de la sucesión, es decir:

$$G \in \Gamma \Leftrightarrow \#\{n : a_n \in G\} < \infty.$$

Vamos a probar que Γ es un cubrimiento de X . Supongamos que $x \in X$ y $x \notin G$ para todo $G \in \Gamma$. De modo que, por definición, cada abierto que contiene a x contiene infinitos términos de la sucesión $\{a_n\}$. En particular, podemos encontrar n_1 tal que $a_{n_1} \in B(x, 1)$. Ahora podemos encontrar $n_2 > n_1$ tal que $a_{n_2} \in B(x, \frac{1}{2})$. Y así continuamos, construimos una subsucesión a_{n_k} tal que $a_{n_k} \in B(x, \frac{1}{k})$. Lo que implica que a_{n_k} converge a x , contradiciendo nuestra suposición. De esta manera, Γ es un cubrimiento de X . Sea $G_i, i = 1, \dots, n$, un subcubrimiento finito de X . Es decir

$$X = G_1 \cup \dots \cup G_n.$$

Como cada $G_i, i = 1, \dots, n$, tiene una cantidad finita de términos de la sucesión, concluimos que X contiene una cantidad finita de términos de la sucesión, lo que, claro está, no puede ocurrir. Esto finaliza la demostración de $1 \Rightarrow 3$.

Demostremos ahora que $3 \Rightarrow 2$ empezando por ver que X es totalmente acotado. Nuevamente procedemos por el absurdo, suponiendo que X no es totalmente acotado. Esto implica que existe un $\varepsilon > 0$ tal que X no se puede cubrir con una cantidad finita de conjuntos de diámetro ε . Sea a_1 cualquier punto de X . Como $B(a_1, \varepsilon)$ no cubre X , existe $a_2 \in X - B(a_1, \varepsilon)$. Como $B(a_i, \varepsilon), i = 1, 2$, no cubren X , existe un $a_3 \in X - (B(a_1, \varepsilon) \cup B(a_2, \varepsilon))$. Continuando de esta forma, construimos una sucesión a_n tal que

$$a_n \in X - (B(a_1, \varepsilon) \cup \dots \cup B(a_{n-1}, \varepsilon)).$$

De esta forma tendremos que:

$$d(a_i, a_j) \geq \varepsilon \quad \text{para } i \neq j.$$

Por hipótesis la sucesión a_n tiene una subsucesión convergente, en particular esta subsucesión será de Cauchy. No obstante la desigualdad anterior implica que ninguna subsucesión de $\{a_n\}$ puede ser de Cauchy, contradicción que prueba que X es totalmente acotado.

Veamos ahora que X es completo. Sea $\{a_n\}$ una sucesión de Cauchy en X . Podemos extraer una subsucesión $\{a_{n_k}\}$ convergente a un $a \in X$. Sea $\varepsilon > 0$. Puesto que $\{a_n\}$ es de Cauchy, podemos encontrar $N > 0$ tal que si $n, m > N$ entonces:

$$d(a_n, a_m) < \frac{\varepsilon}{2}. \quad (1.19)$$

Como a_{n_k} converge a a , podemos encontrar un n_k lo suficientemente grande para que $n_k > N$ y:

$$d(a_{n_k}, a) < \frac{\varepsilon}{2}.$$

Así, usando (1.19), tenemos que para $n > N$:

$$d(a_n, a) \leq d(a_n, a_{n_k}) + d(a_{n_k}, a) < \varepsilon.$$

Por último veamos que $2 \Rightarrow 1$. Para este fin elijamos un cubrimiento $\{G_\lambda\}_{\lambda \in L}$ arbitrario de X . Supongamos que este cubrimiento no tiene un subcubrimiento finito. Como X es totalmente acotado, acorde al Ejercicio 1.7.46, podemos cubrir a X por una cantidad finita de bolas de radio 1. alguna de estas bolas no se podrá cubrir por una cantidad finita de G_λ , de lo contrario, si todas se cubren por una cantidad finita, como hay una cantidad finita de estas bolas, podríamos cubrir X por una cantidad finita de G_λ . Llamemos $B(x_1, 1)$ a la bola que no se cubre por finitos G_λ . Como $B(x_1, 1)$ es totalmente acotado, podemos aplicar la construcción anterior a $B(x_1, 1)$ en lugar de X y con bolas de radio $1/2$, en lugar de 1, obteniendo de esta forma una bola $B(x_2, 1/2)$ que no se cubre por una cantidad finita de G_λ . Además podemos suponer que $B(x_2, 1/2) \cap B(x_1, 1) \neq \emptyset$, de lo contrario no hubiera tenido sentido usar la bola $B(x_2, 1/2)$ para cubrir $B(x_1, 1)$. Continuamos de esta forma y producimos una sucesión $B(x_n, 1/2^n)$ (aquí no basta que los radios tiendan a cero, sino que es necesario que la serie de radios converja) de bolas tales que ninguna de ellas se puede cubrir por una cantidad finita de G_λ . Veamos que la sucesión x_n es de Cauchy. Para esto tomemos

$$z_n \in B\left(x_n, \frac{1}{2^n}\right) \cap B\left(x_{n+1}, \frac{1}{2^{n+1}}\right).$$

Entonces

$$d(x_n, x_{n+1}) \leq d(x_n, z_n) + d(z_n, x_{n+1}) < \frac{1}{2^n} + \frac{1}{2^{n+1}} < \frac{1}{2^{n-1}}.$$

Lo que permite utilizar el criterio de comparación para la convergencia de series para demostrar que:

$$\sum_{n=1}^{\infty} d(x_n, x_{n+1}) < \infty.$$

Acorde a un ejercicio de la práctica, esto implica que $\{x_n\}$ es de Cauchy, por ende converge a algún $x_0 \in X$. Como G_λ es un cubrimiento, existe λ_0 tal que $x_0 \in G_{\lambda_0}$. Como G_{λ_0} es abierto, existe un $r > 0$ tal que

$$B(x_0, r) \subset G_{\lambda_0}. \quad (1.20)$$

Puesto que x_n converge a x_0 y $1/2^{n-1}$ converge a 0, podemos hallar n lo suficientemente grande para que:

$$d(x_n, x_0) < \frac{r}{2} \quad \text{y} \quad \frac{1}{2^{n-1}} < \frac{r}{2}. \quad (1.21)$$

Veamos que esto, (1.21) y (1.20) implica que:

$$B\left(x_n, \frac{1}{2^n}\right) \subset B(x_0, r) \subset G_{\lambda_0}. \quad (1.22)$$

En efecto, si:

$$y \in B\left(x_n, \frac{1}{2^n}\right),$$

entonces

$$d(y, x_0) \leq d(y, x_n) + d(x_n, x_0) < \frac{1}{2^n} + \frac{r}{2} < r,$$

lo que prueba (1.22), siendo, además, esta inclusión una contradicción puesto que estamos cubriendo la bola $B(x_n, 1/2^n)$ por un sólo G_λ , recordemos que estas bolas no se cubrían por finitos G_λ . (ya terminamos, ¡por fin!) \square

Ojo! está repetido

Lema 1.7.1 [Cubrimiento de Lebesgue] Sea (X, d) un espacio métrico compacto, $\{G_i\}_{i \in \mathcal{I}}$ un cubrimiento de X por conjuntos abiertos: i.e.

$$X = \bigcup_{i \in \mathcal{I}} G_i.$$

Entonces existe un $\delta > 0$ tal que si $A \subset X$ es un conjunto con $\text{diam}(A) < \delta$ entonces existe $i \in \mathcal{I}$ tal que $A \subset G_i$. El número δ se suele llama *número de Lebesgue* número de Lebesgue del cubrimiento.

Demostración. Sea $x \in X$. Existe $i_x \in \mathcal{I}$ tal que $x \in G_{i_x}$. Como G_{i_x} es abierto, existe r_x tal que $B(x; r_x) \subset G_{i_x}$. La colección de bolas $\{B(x; r_x/2)\}_{x \in X}$ es un cubrimiento de X . Como X es compacto, existen una cantidad finita $\{x_1, \dots, x_n\}$ de puntos tales que

$$X = \bigcup_{i=1}^n B(x_i; r_{x_i}/2).$$

Tomemos

$$\delta = \min_{i=1, \dots, n} \frac{r_{x_i}}{2}.$$

Sea ahora $A \subset X$ con $\text{diam}(A) < \delta$. Tomemos cualquier $x \in A$. Debe existir $k = 1, \dots, n$ tal que $x \in B(x_k; r_{x_k}/2) \subset B(x_k; r_{x_k}) \subset G_j$, donde por simplicidad pusimos $j = i_{x_k}$. Sea ahora y otro punto en A . Entonces tenemos

$$d(y, x_k) \leq d(y, x) + d(x, x_k) \leq \delta + \frac{r_{x_k}}{2} \leq \frac{r_{x_k}}{2} + \frac{r_{x_k}}{2} = r_{x_k}$$

Entonces $y \in B(x_k; r_{x_k}) \subset G_j$. Hemos probado $A \subset G_j$. \square

1.7.1 Ejercicios

Ejercicio 1.7.44 Demostrar que un espacio métrico discreto es compacto si, y solo si, es finito.

Ejercicio 1.7.45 Demostrar que un conjunto totalmente acotado es acotado.

Ejercicio 1.7.46 Demostrar que X es totalmente acotado si, y solo si, para cada $\varepsilon > 0$ podemos cubrir X por una cantidad finita de bolas de radio ε .

Ejercicio 1.7.47 Demostrar que un conjunto compacto es cerrado y acotado.

Ejercicio 1.7.48 Demostrar que si $f : (X, d) \rightarrow (Y, d')$ es continua y X compacto entonces $f(X)$ es compacto. Como corolario, demostrar que si $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ y X es compacto entonces f alcanza un máximo y un mínimo.

Ejercicio 1.7.49 Demostrar que un subconjunto de un conjunto precompacto es precompacto.

Ejercicio 1.7.50 Sea (X, d) un e.m., A y B subconjuntos compactos de X . Demostrar que

- i) Existen puntos x e y en A tales que $d(x, y) = \delta(A)$.
- ii) Existe un $x \in A$ e $y \in B$ tales que $d(x, y) = d(A, B)$.
- iii) Si $A \cap B = \emptyset$, entonces $d(A, B) > 0$.

Ejercicio 1.7.51 Sea $\{a_n\}$ una sucesión en un e.m. (X, d) tal que $a_n \rightarrow a$. Demostrar que el conjunto $\{a_n : n \in \mathbb{N}\} \cup \{a\}$ es compacto.

Ejercicio 1.7.52 Sean (X, d) e (Y, d') dos e.m. y $f : X \rightarrow Y$ una función. Demostrar que f es continua si, y solo si, $f|_K : K \rightarrow Y$ es continua para cada compacto K .

Ejercicio 1.7.53 Como se desprende de la teoría, el intervalo $(0, 1)$ no es cerrado en \mathbb{R} . Encontrar un cubrimiento de $(0, 1)$ que no tenga un subcubrimiento finito.

Ejercicio 1.7.54 Sea (X, d) un e.m. compacto y $f : X \rightarrow X$ una función continua. Supongamos que, para todo $x \in X$, se tiene que $f(x) \neq x$. Demostrar que existe $\varepsilon > 0$ tal que $d(f(x), x) > \varepsilon$.

Ejercicio 1.7.55 Sea $A \subset \mathbb{R}$ no compacto, demostrar que existe una función continua $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ que no es acotada. *Sugerencia* Como A es no compacto y $A \subset \mathbb{R}$ entonces o A es no acotado o A es no cerrado, considerar estos dos casos.

Ejercicio 1.7.56 Sea $\{K_n\}$ una sucesión de conjuntos compactos no vacíos, tales que $K_n \supset K_{n+1}$. Demostrar que $\bigcap_{n \in \mathbb{N}} K_n \neq \emptyset$.

Ejercicio 1.7.57 Sea (X, d) un e.m. compacto y $\{U_i\}_{i \in I}$ un cubrimiento por abiertos de X . Demostrar que existe un $\varepsilon > 0$ tal que toda bola de radio ε está contenida en, al menos, un U_i . *Sugerencia* Para cada $x \in X$ elegir r_x tal que $B(x, r_x)$ esta contenida en algún U_i . Tomar un subcubrimiento finito de estas bolas y luego considerar ε como el mínimo de las mitades de los radios de las bolas del subcubrimiento.

Ejercicio 1.7.58 Utilizar la siguiente “idea” para dar una demostración alternativa de que compacto implica completo. Tomar una suseción de Cauchy $\{a_n\}$ en X . De la desigualdad

$$|d(x, a_n) - d(x, a_m)| \leq d(a_n, a_m) \quad n, m \in \mathbb{N} \quad x \in X$$

concluir que $d(x, a_n)$ es una sucesión de Cauchy en \mathbb{R} y de esto que la siguiente función esta bien definida:

$$f(x) := \lim_{n \rightarrow \infty} d(x, a_n).$$

Notar que $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ y por ende f alcanza un mínimo en algún $a \in X$. Por último demostrar que a es el límite de a_n .

1.8 Conexión

La definición de conjunto **conexo**, **arco conexo** es idéntica a la que ya hemos estudiado. Los conjuntos conexos, así definidos, satisfacen las mismas propiedades que ya observamos para la métrica euclídea, con una excepción. El hecho que valga las mismas propiedades nos permite definir el concepto de **componente conexa** de la misma forma que lo hicimos para \mathbb{R}^n .

La propiedad que no continua valiendo, en espacios métricos en general, es aquella que afirmaba que las componentes conexas de conjuntos abiertos eran abiertas. Esto es así pues en la demostración de tal propiedad utilizamos que una bola era un conjunto conexo y por el siguiente ejercicio:

Ejercicio 1.8.59 Encontrar un ejemplo de espacio métrico que tenga bolas desconexas.

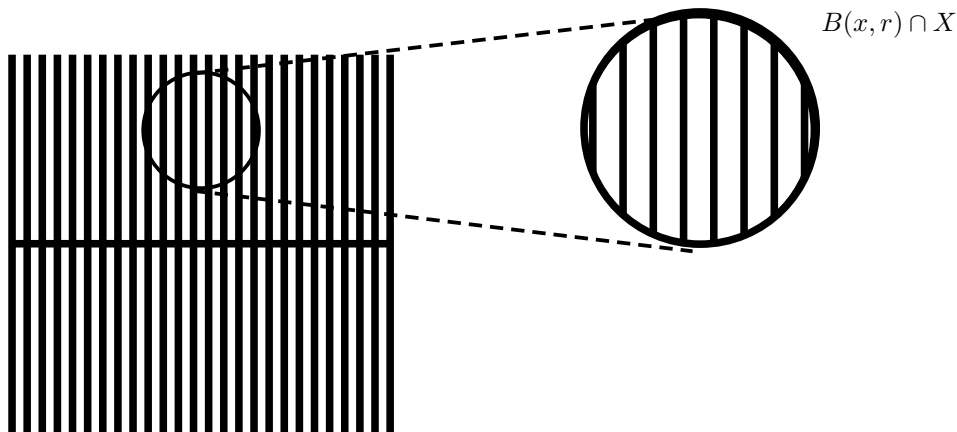
Para conservar tal propiedad podríamos “pedir” la hipótesis que las bolas sean conexas. No obstante observaremos que en tal demostración podríamos haber utilizado cualquier entorno conexo que fuera bola o no. Esto nos lleva a la siguiente definición:

Definición 1.8.26 Un espacio métrico (X, d) se llama **localmente conexo** si para todo $x \in X$ y $r > 0$ existe un entorno conexo V de x tal que $V \subset B(x, r) \subset X$.

\mathbb{R}^n es localmente conexo, podemos utilizar como V la misma bola que aparece en la definición anterior. Lo curioso del caso es que hay espacios métricos (X, d) tales que X es conexo y, sin embargo, X no es localmente conexo.

Ejemplo 1.8.32 Sea $X = \mathbb{Q} \times \mathbb{R} \cup \{(x, 0) : x \in \mathbb{R}\}$ y consideremos este X como subespacio de \mathbb{R}^2 . En la figura 1.3 hemos hecho un bosquejo, está claro que es imposible lograr exactitud, del gráfico X .

Notesé que si tomamos un punto en X pero no sobre el eje horizontal y consideramos una bola de centro x y un radio suficientemente chico de modo que la bola no interseque el mencionado eje, entonces $B(x, r) \cap X$ está compuesto de un conjunto de segmentos verticales desconexos entre si. Si ahora buscamos un conjunto conexo V tal que

Figura 1.3: El subespacio X

$V \subset B(x, r)$ notaremos que V debería ser un subconjunto de alguno de los segmentos verticales, precisamente de aquel segmento que tenga el x dentro de si, pero tal V no será un entorno. Lo que prueba que el espacio (X, d) no es localmente conexo.

1.8.1 Ejercicios

Ejercicio 1.8.60 Demostrar que los siguientes conjuntos son desconexos:

1. $(0, 3) \cup [4, 6)$.
2. $\mathbb{R} - \mathbb{Q}$.
3. $\{1/n : n \in \mathbb{N}\} \cup \{0\}$.

Ejercicio 1.8.61 ¿Cuáles de los siguientes conjuntos son conexos? Justificar la respuesta.

- i) $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} \{(x, \frac{1}{n}x) : x \in \mathbb{R}\}$.
- ii) $\mathbb{R} \times \mathbb{R} - \mathbb{I} \times \mathbb{I}$, donde \mathbb{I} son los números irracionales.
- iii) $\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x \neq 1\}$.
- iv) $\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x \neq 1\} \cup \{(1, 0)\}$.

Ejercicio 1.8.62 Supongamos que A y B son conjuntos conexos de un e.m.. Demostrar, dando contraejemplos, que no necesariamente deben ser conexos los siguientes conjuntos $A \cap B$, $A \cup B$, ∂A y A^0 .

Ejercicio 1.8.63 Sea (X, d) un e.m. conexo e (Y, d) un e.m. discreto. Demostrar que una función $f : X \rightarrow Y$ continua es constante.

Ejercicio 1.8.64 Sean A y B subconjuntos conexos de un e.m. Demuestra que si $\overline{A} \cap B \neq \emptyset$ entonces $A \cup B$ es conexo.

Ejercicio 1.8.65 Probar que todo espacio ultramétrico es totalmente desconexo.

Ejercicio 1.8.66 Sea $\{K_n\}$ una sucesión de conjuntos compactos y conexos de un e.m., supongamos que la sucesión es decreciente, es decir $K_n \supset K_{n+1}$. Demostrar que $\bigcap_{n \in \mathbb{N}} K_n$ es conexo. Dar un ejemplo de una sucesión como la anterior, cambiando compacto por cerrado, tal que $\bigcap_{n \in \mathbb{N}} K_n$ no sea conexo.

Ejercicio 1.8.67 Dado un conjunto A de un e.m. (X, d) definimos la función característica del conjunto A por:

$$1_A(x) := \begin{cases} 1, & \text{si } x \in A; \\ 0, & \text{si } x \notin A. \end{cases}$$

Demostrar que X es conexo si, y solo si, no existe una función característica 1_A , con $A \neq \emptyset$ y $A \neq X$, continua.

Ejercicio 1.8.68 Demostrar que el espacio métrico (X, d) es localmente conexo si, y sólo si, las componentes conexas de conjuntos abiertos son abiertas.

Ejercicio 1.8.69 Sea (X, d) un espacio métrico localmente conexo y compacto. Demostrar que X tiene, a lo sumo, una cantidad finita de componentes.

Ejercicio 1.8.70 Sea X, d un espacio métrico homeomorfo a \mathbb{Z} demostrar que las componentes conexas de X son conjuntos unitarios. Este tipo de espacios se llaman totalmente desconexos.

Bibliografía

Indice Conceptos

Bola, 4

conjunto

magro, 27

nunca denso, 27

primera categoría, 27

segunda categoría, 27

Desigualdad triángular, 2

Distancia, 2

Diámetro, 4

Esfera, 4

Espacio Euclideo, 2

Espacio métrico, 2

Métrica, 2

discreta, 2

euclidea, 2

métrica

caballo ajedrez, 3

geodésica, 3

Sucesión, 23

Indice de Personas

Baire, 27

Frechet, 2