

# Análisis Matemático III

Javier Ortín Rodenas

Curso 2025-2026

# Contenidos

<b>II Integral de Lebesgue</b>	<b>4</b>
1. Integral de Lebesgue para funciones no negativas . . . . .	4
2.1.1 Convenio $0 \cdot \infty$ . . . . .	4
2.1.2 Definición de integral de funciones simples . . . . .	4
2.1.3 Linealidad del integrando . . . . .	5
2.1.4 Linealidad parcial . . . . .	5
2.1.5 Monotonía de la integral simple . . . . .	6
2.1.6 Linealidad de la integral simple por constantes . . . . .	6
2.1.7 Integral de funciones medibles no negativas . . . . .	7
2.1.8 Ejemplos de integrales . . . . .	7
2.1.9 Propiedades básicas . . . . .	8
2.1.10 Teorema de la convergencia monótona . . . . .	10
2.1.11 Integral de la suma . . . . .	11
2.1.12 Integrales en conjuntos disjuntos . . . . .	11
2.1.13 Lema de Fatou . . . . .	12
2.1.14 Definición de igualdad en casi todo punto . . . . .	12
2.1.15 Medibilidad de funciones iguales en casi todo punto . . . . .	13
2.1.16 Integral de funciones iguales en casi todo punto . . . . .	13
2.1.17 Integral de funciones nulas en casi todo punto . . . . .	13
2. Integral de Lebesgue para funciones $f : x \longrightarrow \overline{\mathbb{R}}$ . . . . .	15
2.2.1 Funciones integrables y sumables . . . . .	15
2.2.2 Desigualdad triangular . . . . .	15
2.2.3 Definición de conjunto de funciones sumables . . . . .	16
2.2.4 Teorema de estructura de $\mathcal{L}_1$ . . . . .	16
2.2.5 Integral de funciones sumables en conjuntos disjuntos . . . . .	17
2.2.6 Funciones $\mu$ -a.e. a sumables en $\mathcal{L}_1$ . . . . .	18
2.2.7 Teorema de Convergencia Dominada . . . . .	18
3. Cálculo de la integral de Lebesgue en $\mathbb{R}$ . . . . .	20
2.3.1 Equivalencia de las integrales de Riemann y Lebesgue . . . . .	20
2.3.2 Definición de función localmente integrable . . . . .	22
2.3.3 Medibilidad de funciones localmente integrables . . . . .	23
2.3.4 Integral de Lebesgue e integral impropia de Riemann . . . . .	23
2.3.5 Ejemplo de no equivalencia . . . . .	24
2.3.6 Definición de integral impropia de Lebesgue . . . . .	25
2.3.7 Derivación bajo el signo integral . . . . .	25
2.3.8 Integrales de funciones de componentes en $\mathbb{R}^2$ . . . . .	27
4. Cálculo de la integral de Lebesgue en $\mathbb{R}^N$ . . . . .	30
2.4.1 Notación y conceptos iniciales . . . . .	30

2.4.2	Propiedades de las secciones . . . . .	30
2.4.3	Teorema de anomalías de conjuntos medibles . . . . .	32
2.4.4	Teorema de Tonelli . . . . .	35
2.4.5	Teorema de Fubini . . . . .	38
2.4.6	Teorema de Cambio de Variable . . . . .	40

# II Integral de Lebesgue

## §1. Integral de Lebesgue para funciones no negativas

### 2.1.1 Convenio $0 \cdot \infty$

Consideramos  $0 \cdot \infty = 0$  siempre y cuando al menos uno de los dos factores represente la medida de algún conjunto.

### 2.1.2 Definición de integral de funciones simples

Dado un espacio de medida  $(X, \Sigma, \mu)$  y una función simple medible

$$s : X \longrightarrow [0, +\infty) \quad \text{con expresión canónica } s = \sum_{i=1}^n \lambda_i X_{A_i}$$

Definimos la integral de Lebesgue de  $s$  sobre  $X$  como el número:

$$\int_X s \, d\mu = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \mu(A_i)$$

**Nota:** Implícitamente, ya está definida la integral de  $s$  sobre  $\Sigma(E) \, \forall E \in \Sigma$ :

$$\int_E s \, d\mu = \int_X s|_E \, d\mu = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \mu(E \cap A_i)$$

### 2.1.3 Linealidad del integrando

Dado un espacio de medida  $(X, \Sigma, \mu)$ . Sea  $s : X \rightarrow [0, \infty)$  una función simple y medible. Sean  $\{E_i\}_{i \in \mathbb{N}}$  con  $i \neq j \Rightarrow E_i \cap E_j = \emptyset$ . Entonces, se cumple:

$$\int_{\bigcup_{i \in \mathbb{N}} E_i} s \, d\mu = \sum_{i=1}^{\infty} \int_{E_i} s \, d\mu$$

**Demostración:** Sea  $s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot X_{A_i}$  la expresión canónica de  $s$ . Entonces,

$$\begin{aligned} \int_{\bigcup_{i \in \mathbb{N}} E_i} s \, d\mu &= \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \mu\left(A_i \cap \bigcup_{i \in \mathbb{N}} E_i\right) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \sum_{j=1}^{\infty} \mu(A_i \cap E_j) = \\ &= \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^{\infty} \lambda_i \cdot \mu(A_i \cap E_j) \right) = \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \mu(A_i \cap E_j) = \sum_{j=1}^{\infty} \int_{E_j} s \, d\mu \end{aligned}$$

### 2.1.4 Linealidad parcial

Sea  $(X, \Sigma, \mu)$  un espacio de medida. Sean  $s, t : X \rightarrow [0, \infty)$  funciones simples y medibles. Entonces, se cumple:

$$\int_X s + t \, d\mu = \int_X s \, d\mu + \int_X t \, d\mu$$

**Demostración:** Sean sus expresiones canónicas las siguientes:

$$s = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \mu(A_i) \qquad t = \sum_{j=1}^m \beta_j \cdot \mu(B_j)$$

Entonces, como  $\{A_i\}_{i=1}^n$  y  $\{B_j\}_{j=1}^m$  son recubrimientos disjuntos de  $X$ , se tiene:

$$\begin{aligned} \int_X s \, d\mu &= \sum_{i=1}^n \alpha_i \sum_{j=1}^m \mu(A_i \cap B_j) = \sum_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m}} \alpha_i \cdot \mu(A_i \cap B_j) \\ \int_X t \, d\mu &= \sum_{j=1}^m \beta_j \sum_{i=1}^n \mu(A_i \cap B_j) = \sum_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m}} \beta_j \cdot \mu(A_i \cap B_j) \end{aligned}$$

Sumando ambas expresiones obtenemos:

$$\begin{aligned} \int_X s \, d\mu + \int_X t \, d\mu &= \sum_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m}} (\alpha_i + \beta_j) \cdot \mu(A_i \cap B_j) = \\ &= \sum_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m}} \int_{A_i \cap B_j} s + t \, d\mu = \int_X s + t \, d\mu \end{aligned}$$

La última igualdad se deduce de la linealidad del integrando.

### 2.1.5 Monotonía de la integral simple

Sea  $(X, \Sigma, \mu)$  un espacio de medida. Sean  $s, t : X \rightarrow [0, \infty)$  funciones medibles simples tales que  $s(x) \leq t(x) \forall x \in X$ . Entonces, se cumple:

$$\int_X s \, d\mu \leq \int_X t \, d\mu$$

**Demostración:** Sean sus expresiones canónicas:  $s = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot X_{A_i}$   $t = \sum_{j=1}^m \beta_j \cdot X_{B_j}$ .

$$\int_X s \, d\mu = \sum_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m}} \alpha_i \mu(A_i \cap B_j) \quad \int_X t \, d\mu = \sum_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m}} \beta_j \mu(A_i \cap B_j)$$

Por hipótesis, tenemos que  $s(x) \leq t(x)$  para todo  $x \in X$ . De este modo; sean  $i \in \{1, \dots, n\}, j \in \{1, \dots, m\}$  cualesquiera, tenemos que o bien  $\alpha_i \leq \beta_j$  o bien  $A_i \cap B_j = \emptyset \Rightarrow \mu(A_i \cap B_j) = 0$ . Por tanto, cada sumando del sumatorio de la izquierda va a ser menor o igual que el término de mismos índices del sumatorio de la derecha, hemos demostrado el resultado.

### 2.1.6 Linealidad de la integral simple por constantes

Sea  $(X, \Sigma, \mu)$  un espacio de medida. Sea  $s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot X_{A_i}$  una función simple, medible y no negativa. Entonces:

$$\int_X c \cdot s \, d\mu = c \cdot \int_X s \, d\mu \quad \forall c \in \mathbb{R}$$

**Demostración:** Distinguimos dos casos:

- Si  $c = 0$ , entonces  $s \cdot c \equiv 0$  y se cumple:

$$\int_X c \cdot s \, d\mu = \int_X 0 \, d\mu = 0 \cdot \mu(X) = 0 = 0 \cdot \int_X s \, d\mu$$

- Si  $c \neq 0$ , entonces:

$$\int_X c \cdot s \, d\mu = \sum_{i=1}^n c \cdot \lambda_i \cdot X_{A_i} = c \cdot \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \mu(X_{A_i}) = c \cdot \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \mu(A_i) = c \cdot \int_X s \, d\mu$$

### 2.1.7 Integral de funciones medibles no negativas

Sea  $(X, \Sigma, \mu)$  un espacio de medida. Sea  $f : X \rightarrow [0, +\infty]$  medible. Se define la integral de Lebesgue de  $f$  sobre  $X$  como:

$$\int_X f \, d\mu = \sup \left\{ \int_X s \, d\mu \mid 0 \leq s \leq f, s \text{ función simple medible} \right\} = \sup \mathcal{S}_X(f)$$

Nótese que el conjunto anterior no es vacío, pues  $s \equiv 0$  está en él. Además, se puede extender la definición anterior a cualquier subconjunto medible de  $X$ .

### 2.1.8 Ejemplos de integrales

i) Función de Dirichlet:  $X_{\mathbb{Q}}$ .

Consideramos el espacio de medida  $([0, 1], \mathfrak{M}_1([0, 1]), \mu_1)$ . Esta función no es integrable en el sentido de Riemann, pues las sumas inferiores son siempre nulas y las superiores toman valor 1 (se debe a la densidad de los racionales y los irracionales). Veamos que  $X_{\mathbb{Q}}$  sí es integrable en el sentido de Lebesgue.

Tenemos que  $X_{\mathbb{Q}}$  es una función simple, pues toma el valor 1 en  $[0, 1] \cap \mathbb{Q}$ , que es numerable, y el valor 0 en  $[0, 1] \setminus \mathbb{Q}$ , que es medible al ser el complementario del conjunto anterior en este espacio de medida. Su integral viene dada por:

$$\int_{[0,1]} X_{\mathbb{Q}} \, d\mu = 1 \cdot \mu([0, 1] \cap \mathbb{Q}) + 0 \cdot \mu([0, 1] \setminus \mathbb{Q}) = 1 \cdot 0 + 0 \cdot 1 = 0$$

ii) Consideramos el mismo espacio de medida que en el caso anterior. Veamos que la función de Thomae es integrable. Se define como sigue:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \in \mathbb{Q} \cap [0, 1] \cup \{0\} \\ \frac{1}{q} & \text{si } x = \frac{p}{q} \text{ para } p, q \text{ naturales primos entre sí} \end{cases}$$

Sabemos por Análisis Matemático II que esta función es integrable-Riemann en  $[0, 1]$  con valor de su integral igual a 0. Veamos que ocurre lo mismo con la integral de Lebesgue. Sea  $s$  una función simple medible tal que  $0 \leq s \leq f$ . Se cumple  $M := \max s([0, 1]) \leq 1$ . Los puntos donde  $s$  toma valores positivos son a lo sumo numerables, pues se cumple:

$$f^{-1}((0, +\infty)) = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} \bigcup_{i=1}^n \frac{i}{n}$$

Los puntos donde  $s$  toma valores positivos han de estar contenidos en el conjunto anterior, que es numerable y tiene por tanto medida nula. De este modo, tenemos:

$$0 \leq \int_{[0,1]} s \, d\mu = 0\mu(s^{-1}(\{0\})) + M \cdot \mu(s^{-1}((0, M])) = 0$$

### 2.1.9 Propiedades básicas

Sea  $(X, \Sigma, \mu)$  un espacio de medida. Sean  $f, g : X \leftarrow [0, \infty]$  funciones medibles. Sean  $E, F \in \Sigma$ . Sea  $c \in [0, +\infty)$ . Se cumplen los siguientes enunciados:

- i)  $0 \leq f \leq g \Rightarrow \int_X f \, d\mu \leq \int_X g \, d\mu$
- ii)  $\int_X c f \, d\mu = c \cdot \int_X f \, d\mu$
- iii)  $f \equiv 0 \Rightarrow \int_X f \, d\mu = 0$
- iv)  $\mu(E) = 0 \Rightarrow \int_E f \, d\mu = 0$
- v) Si  $E \subseteq F$ ; entonces,  $\int_E f \, d\mu = \int_D f \cdot X_E \, d\mu$  y  $\int_E f \, d\mu \leq \int_D f \, d\mu$

#### **Demostración:**

i) Sea  $s : X \rightarrow [0, +\infty)$  una función simple medible tal que  $s \leq f$ . Entonces se



cumple  $s \leq g$ . Por tanto, siguiendo la notación del resultado 2.1.7, tenemos que  $\mathcal{S}_X(f) \subseteq \mathcal{S}_X(g)$  luego ha de cumplirse:

$$\int_X f d\mu = \sup \mathcal{S}_X(f) \leq \sup \mathcal{S}_X(g) = \int_X g d\mu$$

ii) Distinguimos dos casos: En primer lugar, si  $c = 0$  se tiene:

$$\int_X c \cdot f d\mu = \int_X 0 d\mu = 0 = 0 \cdot \int_X f d\mu$$

Si  $c \in (0, +\infty)$ ; entonces, tenemos:

$$c \cdot \int_X f d\mu = c \cdot \sup \left\{ \int_X s d\mu : 0 \leq s \leq f \text{ con } s \text{ función medible simple} \right\} = \sup c \cdot \mathcal{S}_X(f)$$

$$\int_X c \cdot f d\mu \sup \left\{ \int_X s d\mu : 0 \leq t \leq c \cdot f \text{ con } t \text{ función medible simple} \right\} = \sup \mathcal{S}_X(c \cdot f)$$

Al cumplirse  $c \in (0, +\infty)$ , tenemos que  $0 \leq f \leq s \iff 0 \leq c \cdot s \leq c \cdot f$  luego las integrales han de coincidir.

iii iv) Trivial.

v) Comencemos por ver la primera parte. Sea una función simple y medible  $s : F \rightarrow [0, +\infty)$  tal que  $s \leq f \cdot X_E$ . Entonces se tiene  $s|_E$  es simple también. Además, se cumple:

$$\int_F s d\mu = \int_E s|_E d\mu + \int_{F \setminus E} 0 d\mu = \int_E s|_E d\mu$$

De manera similar, sea  $t : E \rightarrow [0, +\infty)$  simple tal que  $t \leq f$ , podemos extender  $t$  a  $F$  al considerar  $\hat{t}(x) = t(x)$  si  $x \in E$  ó 0 si  $x \in F \setminus E$ . La función resultante  $\hat{t}$  es simple, medible y cumple  $\hat{t} \leq f \cdot X_E$ . De este modo,

$$\int_F \hat{t} d\mu = \int_{F \setminus E} 0 d\mu + \int_E \hat{t} d\mu = \int_E t d\mu$$

Por tanto, se cumple  $\mathcal{S}_E(f) = \mathcal{S}_F(f \cdot X_E)$  luego las integrales coinciden.

Este razonamiento de extender  $t$  a  $\hat{t}$  demuestra también que  $\mathcal{S}_E(f) \subseteq \mathcal{S}_F(f)$  luego por definición de supremo, se tiene:

$$\int_E f d\mu = \sup \mathcal{S}_E(f) \leq \sup \mathcal{S}_F(f) = \int_F f d\mu$$

Se cumple también la segunda parte.

### 2.1.10 Teorema de la convergencia monótona

Dado un espacio de medida  $(X, \Sigma, \mu)$ . Sea  $\{f_n : X \rightarrow [0, +\infty]\}_{n \in \mathbb{N}}$  una sucesión de funciones medibles tales que:

$$\forall x \in X \quad \forall n \in \mathbb{N} : f_n(x) \leq f_{n+1}(x) \quad f_n(x) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} f(x)$$

Entonces, existe el límite de la integrales y coincide con la integral de la función límite:

$$\lim_n \int_X f_n d\mu = \int_X \lim_n f_n d\mu = \int_X f d\mu$$

#### Demostración:

Como  $f_n \leq f_{n+1}$  por hipótesis para todo  $n \in \mathbb{N}$ . Aplicando la monotonía de la integral, tenemos:

$$\int_X f_n d\mu \leq \int_X f_{n+1} d\mu \Rightarrow \exists \lim_n \int_X f_n d\mu = \alpha \in [0, +\infty]$$

Al ser una sucesión monótona, o bien converge o diverge. Es por ello que podemos garantizar la existencia del límite,  $\alpha$ .

Como  $f_n(x) \xrightarrow{n \rightarrow \infty}$  de manera creciente para todo  $x \in X$ , para cada  $n \in \mathbb{N}$  tenemos  $f_n \leq f \Rightarrow \int_X f_n d\mu \leq \int_X f d\mu \Rightarrow \alpha \leq \int_X f d\mu$ . Queda demostrar  $\int_X f d\mu \leq \alpha$ . Para ello, sea  $s : X \rightarrow [0, +\infty]$  una función simple y medible con  $s \leq f$ , basta ver que  $\int_X s d\mu \leq \alpha$ .

Sea  $c \in [0, 1)$ . Para cada  $x \in X$  existe  $n_x \in \mathbb{N}$  tal que  $c \cdot s(x) \leq f_n(x) \leq f(x) \quad \forall n \geq n_x$ . Podemos suponer sin pérdida de generalidad que  $s(x) = \infty$  para aquellos  $x$  con  $f(x) = \infty$  para que se cumpla el razonamiento anterior. Para cada  $n \in \mathbb{N}$ , consideramos el siguiente conjunto:

$$E_n := \{x \in X : c \cdot s_x \leq f_k(x) \leq f(x) \quad \forall k \geq n\} \in \Sigma$$

Al ser  $s, f_n, f$  medibles, podemos garantizar que  $E_n$  es medible. Por definición, es claro que  $E_n \subseteq E_{n+1}$ . Además, se tiene  $x \in X \Rightarrow x \in E_{n_x} \Rightarrow X = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} E_n$ .

Sea  $s = \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot X_{A_i}$  la expresión canónica de  $s$ , se cumple:

$$\int_{E_n} c \cdot s \, d\mu \leq \int_{E_n} f_n \, d\mu \leq \int_{E_n} f \, d\mu$$

Pero por definición de integral simple, se cumple:

$$\int_{E_n} c \cdot s \, d\mu = c \cdot \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot \mu(E_n \cap A_i) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} c \cdot \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot \mu(A_i) = c \cdot \int_X s \, d\mu$$

De este modo, tomando límites en la desigualdad anterior,  $c \cdot \int_X s \, d\mu \leq \alpha$ . Tomando  $\lim_{c \rightarrow 1^-}$  concluimos que  $\int_X s \, d\mu \leq \alpha$ .

### 2.1.11 Integral de la suma

Sea  $(X, \Sigma, \mu)$  un espacio de medida. Sean  $f, g : X \rightarrow [0, +\infty]$  funciones medibles. Entonces, se cumple:

$$\int_X f \, d\mu + \int_X g \, d\mu = \int_X f + g \, d\mu$$

#### Demostración:

Podemos afirmar que existe una colección de funciones simples y medibles  $\{s_n, t_n : X \rightarrow [0, +\infty]\}_{n \in \mathbb{N}}$  tales que para todo  $x \in X$  para todo  $n \in \mathbb{N}$  se cumpla:

$$s_n(x) \leq s_{n+1}(x) \leq f \quad t_n(x) \leq t_{n+1}(x) \leq g \quad s_n(x) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} f(x) \quad t_n(x) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} g(x)$$

Entonces, tenemos que  $s_n + t_n \leq s_{n+1} + t_{n+1}$  y además  $(s_n + t_n)(x) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} (f + g)(x)$ . Aplicando el Teorema de la Convergencia Monótona, tenemos:

$$\int_X f \, d\mu + \int_X g \, d\mu = \lim_n \int_X s_n \, d\mu + \lim_n \int_X t_n \, d\mu = \lim_n \int_X s_n + t_n \, d\mu = \int_X f + g \, d\mu$$

### 2.1.12 Integrales en conjuntos disjuntos

Sea  $(X, \Sigma, \mu)$  un espacio de medida. Sea  $f : X \rightarrow [0, +\infty]$  una función medible. Sean  $\{E_i\}_{i \in \mathbb{N}} \subseteq \Sigma$  con  $i \neq j \Rightarrow E_i \cap E_j = \emptyset$ . Entonces, se cumple:

$$\int_{\bigcup_{i \in \mathbb{N}} E_i} f \, d\mu = \sum_{i=1}^{\infty} \int_{E_i} f \, d\mu$$

### Demostración:

$$\int_{\bigcup_{i=1}^n E_i} f d\mu = \int_X f \cdot X_{\bigcup_{i=1}^n E_i} d\mu = \int_X \sum_{i=1}^n f \cdot X_{E_i} d\mu \stackrel{2.1.11}{=} \sum_{i=1}^n \int_X f \cdot X_{E_i} d\mu$$

Tomando límites llegamos al resultado:

$$\int_{\bigcup_{i \in \mathbb{N}} E_i} f d\mu = \int_X \sum_{i=1}^{\infty} f \cdot X_{E_i} d\mu = \sum_{i=1}^{\infty} \int_X f \cdot X_{E_i} d\mu = \sum_{i=1}^{\infty} \int_{E_i} f d\mu$$

### 2.1.13 Lema de Fatou

Sea  $(X, \Sigma, \mu)$  un espacio de medida. Sea una sucesión de funciones medibles  $\{f_n : X \rightarrow [0, +\infty]\}_{n \in \mathbb{N}}$ . Entonces, se cumple:

$$\int_X \liminf_n f_n d\mu \leq \liminf_n \int_X f_n d\mu$$

### Demostración:

Por definición,  $\liminf_n f_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \inf_{k \geq n} f_k(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} g_n(x)$  Para  $g_n$  medible. Además,  $g_n \leq g_{n+1}$ . De este modo **Nota:** En general, la igualdad no tiene por qué cumplirse:

$$f_n = X_{[n, +\infty)} \quad \int_{\mathbb{R}} \liminf_n f_n d\mu_1 = \int_{\mathbb{R}} 0 d\mu_1 = 0 \quad \int_{\mathbb{R}} f_n d\mu_1 = \infty \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \infty$$

### 2.1.14 Definición de igualdad en casi todo punto

Sea  $(X, \Sigma, \mu)$  un espacio de medida. Sean dos funciones  $f, g : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ . Se dice que  $f$  y  $g$  “son iguales en casi todo punto” si  $\exists B \in \Sigma$  con  $\mu(B) = 0$  tal que:

$$\{x \in X : f(x) \neq g(x)\} \subseteq B$$

En tal caso, se denotará como  $f \stackrel{\mu-a.e.}{=} g$  ó  $f = g \mu - a.e.$ , las letras “a.e.” vienen del término inglés “*almost everywhere*”.

### 2.1.15 Medibilidad de funciones iguales en casi todo punto

Sea  $(X, \Sigma, \mu)$  un espacio de medida completo. Sean  $f, g : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$  funciones tales que  $f \stackrel{\mu-a.e.}{=} g$ . Si  $f$  es medible; entonces,  $g$  es medible también.

**Demostración:**

Sea  $A := \{x \in X : f(x) \neq g(x)\}$ . Por hipótesis,  $f \stackrel{\mu-a.e.}{=} g$  luego  $\exists B \in \Sigma$  con  $\mu(B) = 0$  tal que  $A \subseteq B$ . Al ser  $(X, \Sigma, \mu)$  completo por hipótesis, tenemos que  $A \in \Sigma$  también. De este modo, sea  $\alpha \in \mathbb{R}$  cualquiera,

$$\{x \in X : g(x) < \alpha\} = \underbrace{\{x \in X : f(x) < \alpha\} \cap (X \setminus A)}_{\in \Sigma} \cup \underbrace{\{x \in X : g(x) < \alpha\} \cap A}_{\in \Sigma}$$

El primer subconjunto es medible por ser  $f$  medible por hipótesis. El segundo conjunto es medible al tener también medida nula por ser un subconjunto de  $A$ .

### 2.1.16 Integral de funciones iguales en casi todo punto

Sea  $(X, \Sigma, \mu)$  un espacio de medida. Sean  $f, g : X \rightarrow [0, +\infty]$  funciones medibles. Entonces, se cumple:

$$f \stackrel{\mu-a.e.}{=} g \Rightarrow \int_X f d\mu = \int_X g d\mu$$

**Demostración:** Por ser  $f, g$  medibles,  $A := \{x \in X : f(x) \neq g(x)\} \in \Sigma$ .

Además,  $f \stackrel{\mu-a.e.}{=} g$  luego  $\mu(A) = 0$ . De este modo,

$$\begin{aligned} \int_X f d\mu &= \int_{X \setminus A} f d\mu + \int_A f d\mu = \int_{X \setminus A} f d\mu + 0 = \\ &= \int_{X \setminus A} g d\mu + 0 = \int_{X \setminus A} g d\mu + \int_A g d\mu = \int_X g d\mu \end{aligned}$$

**Nota:** Al definir la integral de Lebesgue para funciones cualesquiera, este resultado será también válido.

### 2.1.17 Integral de funciones nulas en casi todo punto

Sea  $(X, \Sigma, \mu)$  un espacio de medida. Sea  $f : X \rightarrow [0, +\infty]$  una función medible. Entonces,

$$f \stackrel{\mu-a.e.}{=} 0 \iff \int_X f d\mu = 0$$

**Demostración:**

$\Rightarrow$  Se tiene como aplicación directa del resultado anterior.

$\Leftarrow$  Para cada  $n \in \mathbb{N}$  tomamos  $E_n := \{x \in X : f(x) \geq \frac{1}{n}\}$   $f \overset{\text{medible}}{\in} \Sigma$ .

Sea  $E := \bigcup_{n \in \mathbb{N}} E_n \in \Sigma$ . Entonces, para cada  $n \in \mathbb{N}$  se cumple:

$$0 \leq \frac{1}{n} \cdot \mu(E_n) = \int_X \frac{1}{n} \cdot X_{E_n} d\mu \leq \int_{E_n} f d\mu \leq \int_X f d\mu = 0$$

Por tanto,  $\mu(E_n) = 0$  luego  $\mu(E) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \mu(E_n) = 0 \Rightarrow f \overset{\mu\text{-a.e.}}{=} 0$ .

**Nota:**

$\Rightarrow$  La implicación es válida para  $f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ .

$\Leftarrow$  Es necesario exigir  $f \geq 0$ . Por ejemplo,  $\int_{[0, 2\pi]} \sin(x) d\mu(x) = 0$ .

## §2. Integral de Lebesgue para funciones $f : x \longrightarrow \overline{\mathbb{R}}$

### 2.2.1 Funciones integrables y sumables

Sea  $(X, \Sigma, \mu)$  un espacio de medida. Sea  $f : X \longrightarrow \overline{\mathbb{R}}$  medible. Diremos que “ $f$  es integrable sobre  $X$ ” si cumple cualquiera de las siguientes dos condiciones:

$$\int_X f^+ d\mu < \infty \qquad \int_X f^- d\mu < \infty$$

Si  $f$  cumple simultáneamente ambas condiciones, diremos que “ $f$  es sumable” (toda función sumable es integrable). En cualquier caso, podemos definir la integral de  $f$  sobre  $X$  como:

$$\int_X f d\mu = \int_X f^+ d\mu - \int_X f^- d\mu$$

Nótese que como consecuencia inmediata de las definiciones anteriores, los siguientes enunciados son equivalentes:

- i)  $f$  sumable
- ii)  $f^+$  y  $f^-$  sumables
- iii)  $|f|$  sumable
- iv)  $\int_{\mathbb{R}} f d\mu \in \mathbb{R}$
- v)  $\int_{\mathbb{R}} |f| d\mu \in \mathbb{R}$

### 2.2.2 Desigualdad triangular

Dado un espacio de medida  $(X, \Sigma, \mu)$ . Sea  $f : X \longrightarrow \overline{\mathbb{R}}$  integrable. Se cumple:

$$\left| \int_X f d\mu \right| \leq \int_X |f| d\mu$$

**Demostración:** Basta aplicar la desigualdad triangular de los números reales

$$\begin{aligned} \left| \int_X f d\mu \right| &= \left| \int_X f^+ d\mu - \int_X f^- d\mu \right| \leq \left| \int_X f^+ d\mu \right| + \left| \int_X f^- d\mu \right| = \\ &= \int_X f^+ d\mu + \int_X f^- d\mu = \int_X |f| d\mu \end{aligned}$$

### 2.2.3 Definición de conjunto de funciones sumables

Sea  $(X, \Sigma, \mu)$  un espacio de medida. Denotaremos al conjunto de funciones sumables  $f : X \rightarrow \mathbb{R}$  como  $\mathcal{L}_1$  o como  $\mathcal{L}_1(X, \Sigma, \mu)$ . Sea  $E \in \Sigma$ , utilizaremos la siguiente notación abreviada:  $\mathcal{L}_1(E) = \mathcal{L}_1(E, \Sigma(E), \mu|_{\Sigma(E)})$ .

### 2.2.4 Teorema de estructura de $\mathcal{L}_1$

Sea  $(X, \Sigma, \mu)$  un espacio de medida, se cumple:

- i)  $\mathcal{L}_1$  es un espacio vectorial.
- ii)  $\int_X : \mathcal{L}_1 \rightarrow \mathbb{R} \quad f \mapsto \int_X f d\mu$  es una aplicación lineal.

#### Demostración:

i) Sean  $f, g \in \mathcal{L}_1$ . Sean  $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ . Veamos que  $\alpha \cdot f + \beta \cdot g \in \mathcal{L}_1$ .

$$\left| \int_X \alpha \cdot f + \beta \cdot g d\mu \right| \leq \int_X |\alpha \cdot f + \beta \cdot g| d\mu = |\alpha| \int_X |f| d\mu + |\beta| \int_X |g| d\mu \in \mathbb{R}$$

ii) Sean  $\lambda \in \mathbb{R}, f \in \mathcal{L}_1$ . Veamos que  $\int_X \lambda \cdot f d\mu = \lambda \cdot \int_X f d\mu$ . Distinguiremos tres casos:

- Si  $\lambda = 0$ ,  $\int_X \lambda \cdot f d\mu = \int_X 0 d\mu = 0 = 0 \cdot \int_X f d\mu$ .
- Si  $\lambda > 0$ , entonces  $(\lambda f)^+ = \lambda \cdot f^+$  y  $(\lambda f)^- = \lambda \cdot f^-$ . Por tanto,

$$\begin{aligned} \int_X \lambda f d\mu &= \int_X (\lambda f)^+ d\mu + \int_X (\lambda f)^- d\mu = \lambda \int_X f^+ d\mu - \lambda \int_X f^- d\mu = \\ &= \lambda \left( \int_X f^+ d\mu - \int_X f^- d\mu \right) = \lambda \int_X f d\mu \end{aligned}$$

- Si  $\lambda < 0$ , entonces  $(\lambda f)^+ = -\lambda \cdot f^-$  y  $(\lambda f)^- = -\lambda \cdot f^+$ . Por tanto,

$$\begin{aligned} \int_X \lambda f d\mu &= \int_X (\lambda f)^+ d\mu - \int_X (\lambda f)^- d\mu = -\lambda \int_X f^- d\mu + \lambda \int_X f^+ d\mu = \\ &= \lambda \left( \int_X f^+ d\mu - \int_X f^- d\mu \right) = \lambda \int_X f d\mu \end{aligned}$$



Sean  $f, g \in \mathcal{L}_1$ , veamos que  $\int_X f + g \, d\mu = \int_X f \, d\mu + \int_X g \, d\mu$ .

Despejamos para reescribir las partes positiva y negativa de  $f + g$  según las de  $f$  y las de  $g$ :

$$(f+g)^+ - (f+g)^- = f+g = f^+ - f^- + g^+ - g^- \Rightarrow (f+g)^+ + f^- + g^- = (f+g)^- + f^+ + g^+$$

De este modo, se cumple:

$$\begin{aligned} \int_X (f+g)^+ \, d\mu + \int_X f^- \, d\mu + \int_X g^- \, d\mu &= \int_X (f+g)^- \, d\mu + \int_X f^+ \, d\mu + \int_X g^- \, d\mu \Rightarrow \\ \Rightarrow \underbrace{\int_X (f+g)^+ \, d\mu - \int_X (f+g)^- \, d\mu}_{\int_X f+g \, d\mu} &= \underbrace{\int_X f^+ \, d\mu - \int_X f^- \, d\mu}_{\int_X f \, d\mu} + \underbrace{\int_X g^+ \, d\mu - \int_X g^- \, d\mu}_{\int_X g \, d\mu} \end{aligned}$$

Hemos tenido que estructurar esta última parte de la demostración de esta manera al tener que aplicar la linealidad de la integral para funciones no negativas.

## 2.2.5 Integral de funciones sumables en conjuntos disjuntos

Sea  $(X, \Sigma, \mu)$  un espacio de medida. Sea  $\{E_i\}_{i \in \mathbb{N}} \subseteq \Sigma$  tal que  $i \neq j \Rightarrow E_i \cap E_j = \emptyset$ . Sea  $f \in \mathcal{L}_1$ . Entonces, se cumple:

$$\int_{\bigcup_{i \in \mathbb{N}} E_i} f \, d\mu = \sum_{i=1}^{\infty} \int_{E_i} f \, d\mu$$

**Demostración:** Consecuencia del resultado 2.1.12 y de la definición de  $\mathcal{L}_1$ .

$$\begin{aligned} \int_{\bigcup_{i \in \mathbb{N}} E_i} f \, d\mu &= \int_{\bigcup_{i \in \mathbb{N}} E_i} f^+ \, d\mu - \int_{\bigcup_{i \in \mathbb{N}} E_i} f^- \, d\mu = \left( \sum_{i=1}^{\infty} \int_{E_i} f^+ \, d\mu \right) + \left( \sum_{i=1}^{\infty} \int_{E_i} f^- \, d\mu \right) = \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} \left( \int_{E_i} f^+ \, d\mu - \int_{E_i} f^- \, d\mu \right) = \sum_{i=1}^{\infty} \int_{E_i} f \, d\mu \end{aligned}$$

Hemos necesitado la hipótesis de  $f$  sumable para poder agrupar los dos sumatorios en uno solo.

### 2.2.6 Funciones $\mu$ -a.e. a sumables en $\mathcal{L}_1$

Dado un espacio de medida  $(X, \Sigma, \mu)$ . Sea  $f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$  con  $f \in \mathcal{L}_1$ . Entonces existe una función  $g \in \mathcal{L}_1$  tal que  $f \stackrel{\mu\text{-a.e.}}{=} g$ .

**Demostración:** Comencemos por aclarar la diferencia entre sumable y  $\mathcal{L}_1$ .

Toda función  $\mathcal{L}_1$  es sumable, pero no al revés. No podemos garantizar que  $f$  sea  $\mathcal{L}_1$ , pues su codominio es  $\overline{\mathbb{R}}$  y no  $\mathbb{R}$ . Por tanto, buscamos una función  $g : X \rightarrow \mathbb{R}$  sumable tal que  $f \stackrel{\mu\text{-a.e.}}{=} g$ .

Por ser  $f$  sumable, los dos siguientes conjuntos tienen medida nula (de no ser así tendríamos que  $\int_A f^+ d\mu = \infty$  ó  $\int_B f^- d\mu = -\infty$ ):

$$A = \{x \in X : f(x) = +\infty\} \quad B := \{x \in X : f(x) = -\infty\}$$

Por ser  $f$  medible, ambos conjuntos son medibles. Basta definir  $g$  como sigue:

$$g(x) = \begin{cases} f(x) & \text{si } x \in X \setminus (A \cup B) \\ 0 & \text{si } x \in A \cup B \end{cases} \Rightarrow g = f \cdot X_{X \setminus (A \cup B)} \text{ medible}$$

De este modo,  $f \stackrel{\mu\text{-a.e.}}{=} g$  y aplicando el resultado 2.1.16 tenemos que  $g$  es sumable luego  $g \in \mathcal{L}_1$ .

### 2.2.7 Teorema de Convergencia Dominada

Dado un espacio de medida  $(X, \Sigma, \mu)$ . Sea una colección de funciones medibles  $\{f_n : X \rightarrow \mathbb{R}\}_{n \in \mathbb{N}}$  tales que  $f_n(x) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} f(x)$  para todo  $x \in X$  para cierta función  $f$ . Si existe  $g \in \mathcal{L}_1$  tal que  $|f_n| \leq g \ \forall n \in \mathbb{N}$ . Entonces, se cumple:

- i)  $f \in \mathcal{L}_1$
- ii)  $\left(\int_X |f_n - f| d\mu\right) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$
- iii)  $\int_X f_n d\mu \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \int_X f d\mu$

**Demostración:**

$$i) \ \forall n \in \mathbb{N} \ \forall x \in X : |f_n(x)| \leq g(x) \Rightarrow |f(x)| \leq g(x) \Rightarrow \int_X |f| d\mu \leq \int_X g d\mu < \infty.$$

ii)  $\forall n \in \mathbb{N} : |f_n - f| \leq |f_n| + |f| \leq 2g$  Luego  $f_n + f \in \mathcal{L}_1$ . Despejando,  $2g - |f_n - f| \leq 0$ . Por tanto, estamos en condiciones de aplicar el Lema de Fatou,

$$\int_X \liminf_n 2g - |f_n - f| d\mu \leq \liminf_n \int_X 2g - |f_n - f| d\mu$$

Por hipótesis, sabemos que existe  $\lim_n 2g - |f_n - f| = 2g$  luego podemos pasar del límite inferior al límite en el primer miembro de la desigualdad. Desglosando la integral de la resta como resta de integrales y aplicando las definiciones de límite inferior y superior:

$$\int_X 2g d\mu \leq \liminf_n \left( \int_X 2g d\mu - \int_X |f_n - f| d\mu \right) = \int_X 2g d\mu - \overline{\lim}_n \int_X |f_n - f| d\mu$$

Restando  $\int_X 2g d\mu$  en ambos lados:

$$0 \leq -\overline{\lim}_n \int_X |f_n - f| d\mu \Rightarrow 0$$

iii) Por el apartado anterior, sabemos que  $\forall \varepsilon > 0 \exists n_0 \in \mathbb{N}$  tal que que  $\forall n \geq n_0$  se cumple:

$$\left| \int_X f_n d\mu - \int_X f d\mu \right| \stackrel{(*)}{=} \left| \int_X f - f_n d\mu \right| \stackrel{2.2.2}{\leq} \int_X |f_n - f| d\mu < \varepsilon$$

(\*) Hemos aplicado la linealidad de la integral en  $\mathcal{L}_1$  pues  $f, f_n \in \mathcal{L}_1$ .

## §3. Cálculo de la integral de Lebesgue en $\mathbb{R}$

### 2.3.1 Equivalencia de las integrales de Riemann y Lebesgue

Sea  $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  acotada. Entonces, los siguientes enunciados son equivalentes:

- i)  $\mu_1(\{x \in X : f \text{ es discontinua en } x\}) = 0$ .
- ii)  $f$  es integrable Riemann; es decir,  $f \in \mathcal{R}([a, b])$ .

Además, si  $f \in \mathcal{R}([a, b])$ ; entonces,  $\int_{[a, b]} f d\mu = \int_a^b f$ .

#### **Demostración:**

Al estar acotada,  $\exists M \in [0, +\infty)$  tal que  $|f(x)| \leq M \forall x \in [a, b]$ . Consideramos una sucesión de particiones de  $[a, b]$ ,

$$P_n = \{x_0^n = a < x_1^n < \dots < x_{k_n}^n = b\}$$

de modo que para cada  $n \in \mathbb{N}$   $P_n$  verifica simultáneamente las siguientes condiciones:

$$x_i^n - x_{i-1}^n < \frac{1}{n} \qquad P_n \subseteq P_{n+1}$$

Sea  $n \in \mathbb{N}$ , sea  $i \in \{1, \dots, k_n\}$ . Introducimos la siguiente notación:

$$M_i^n := \sup \left\{ f(x) : x \in [x_{i-1}^n, x_i^n] \right\} \qquad m_i^n := \inf \left\{ f(x) : x \in [x_{i-1}^n, x_i^n] \right\}$$

De este modo,  $-M \leq m_i^n \leq M_i^n \leq M$ . Además, para cada  $n \in \mathbb{N}$  las dos siguientes funciones son simples y  $\mu_1$ -medibles:

$$s_n := \sum_{i=1}^{k_n} M_i^n \cdot X_{[x_{i-1}^n, x_i^n]} \qquad t_n := \sum_{i=1}^{k_n} m_i^n \cdot X_{[x_{i-1}^n, x_i^n]}$$

Por definición de integral de funciones simples, tenemos que las integrales de  $s_n$  y

$t_n$  son las sumas superior e inferior de Darboux de  $P_n$ , respectivamente. Es decir,

$$\int_{[a,b]} s_n d\mu = \sum_{i=1}^{k_n} M_i^n \cdot \mu([x_{i-1}^n, x_i^n]) = \sum_{i=1}^{k_n} M_i^n \cdot (x_i^n - x_{i-1}^n) = \overline{S}(f, P_n) < \sum_{i=1}^{k_n} M_i^n \cdot \frac{1}{n}$$

$$\int_{[a,b]} t_n d\mu = \sum_{i=1}^{k_n} m_i^n \cdot \mu([x_{i-1}^n, x_i^n]) = \sum_{i=1}^{k_n} m_i^n \cdot (x_i^n - x_{i-1}^n) = \underline{S}(f, P_n) < \sum_{i=1}^{k_n} m_i^n \cdot \frac{1}{n}$$

El conjunto de vértices de todas las particiones  $P_n$  es numerable:

$$V := \{x_i^n : n \in \mathbb{N}, i \in \{1, \dots, k_n\}\}$$

Además, sea  $n \in X$ , por hipótesis, tenemos  $P_n \subseteq P_{n+1}$ . Sea  $x \in [a, b]$ , tenemos  $s_n(x) \geq s_{n+1}(x)$  y  $t_n(x) \leq t_{n+1}(x)$ . Al ser funciones monótonas y acotadas, podemos asegurar que existe su límite. Sean  $s$  y  $t$  los límites de  $s_n$  y  $t_n$ , respectivamente. Sea  $x_0 \in [a, b] \setminus V$ . Veamos que  $f$  es continua en  $x_0$  si y solo si  $s(x_0) = t(x_0)$ .

$$\Rightarrow \quad \text{Por hipótesis, } \forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 : |x - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x) - f(x_0)| < \varepsilon$$

Elegimos  $n \in \mathbb{N}$  tal que si  $j \in \mathbb{N}$  es tal que  $x_0 \in (x_{j-1}^n, x_j^n)$  entonces  $(x_{j-1}^n; x_j^n) \subseteq (x_0 - \delta, x_0 + \delta)$ . Así, para cualquier  $x \in (x_{j-1}^n, x_j^n)$  se cumple:

$$f(x_0) - \varepsilon \leq m_j^n \leq f(x) \leq M_j^n \leq f(x_0) + \varepsilon$$

Por tanto,  $0 \leq s(x_0) - t(x_0) \leq s_n(x_0) - t_n(x_0) \leq 2\varepsilon \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} 0$ .

$$\Leftarrow \quad \text{Supongamos } s(x_0) = f(x_0) = t(x_0) \text{ para ver } f \text{ continua en } x_0.$$

$$\lim_n s_n(x_0) = s(x_0) = f(x_0) = t(x_0) = \lim_n t_n(x_0)$$

Así, sea  $\varepsilon > 0 \exists n \in \mathbb{N}$  tal que  $0 \leq s_n(x_0) - t_n(x_0) < \varepsilon$ . Fijamos este  $n$ . Sea  $j \in \{1, \dots, k_n\}$  el único tal que  $x_0 \in (x_{j-1}^n, x_j^n)$ . Tomamos  $\delta > 0$  suficientemente pequeño como para que  $(x_0 - \delta, x_0 + \delta) \subseteq (x_{j-1}^n, x_j^n)$ . De este modo, para  $x \in (x_0 - \delta, x_0 + \delta)$ , se cumple:

$$f(x_0) - \varepsilon < t_n(x_0) = m_j^n \leq f(x) \leq M_j^n = s_n(x_0) < f(x_0) + \varepsilon$$

Tenemos que  $f$  es continua en  $x_0$  por definición.  
 Volvamos al problema principal.

$$\Rightarrow \left| \begin{array}{l} \text{Supongamos } \mu(\{x \in X : f \text{ es discontinua en } x\}) = 0. \end{array} \right.$$

Denotando  $D$  al conjunto anterior, tenemos que  $\mu(D) = 0 \Rightarrow \mu(D \cap V) = 0$  para  $V$  el conjunto de vértices de las particiones  $P_n$ . De este modo,  $s \stackrel{\mu-a.e.}{=} t \Rightarrow s - t \stackrel{\mu-a.e.}{=} 0$ . Por tanto, aplicando el resultado 2.1.16,

$$0 = \int_{[a,b]} s - t \, d\mu = \int_{[a,b]} \lim_n s_n - t_n \, d\mu \stackrel{TC D}{=} \lim_n \int_{[a,b]} s_n - t_n \, d\mu = \lim_n \overline{S}(f, P_n) - \underline{S}(f, P_n)$$

Según el criterio de Cauchy de integración Riemann, tenemos que  $f \in \mathcal{R}([a, b])$ .

$$\Rightarrow \left| \begin{array}{l} \text{Por el criterio de Cauchy de integración Riemann, podemos} \end{array} \right.$$

suponer que existe  $(P_n)_{n \in \mathbb{N}}$  una sucesión de particiones de  $[a, b]$  tales que  $\overline{S}(f, P_n) - \underline{S}(f, P_n) < \frac{1}{n}$ . Entonces:

$$0 \leq \int_{[a,b]} s - t \, d\mu = \int_{[a,b]} \lim_n s_n - t_n \, d\mu = \lim_n \int_{[a,b]} s_n - t_n \, d\mu = \lim_n \overline{S}(f, P_n) - \underline{S}(f, P_n) = 0$$

De este modo,  $s \stackrel{\mu-a.e.}{=} f \stackrel{\mu-a.e.}{=} t$  luego al estar en un espacio de medida completo tenemos que  $f$  es medible. Por tanto,

$$\begin{aligned} \underline{S}(f, P_n) &\xrightarrow{n \rightarrow \infty} \int_a^b f \\ \underline{S}(f, P_n) &= \int_{[a,b]} t_n \, d\mu \stackrel{TC D}{=} \int_{[a,b]} t \, d\mu = \int_{[a,b]} f \, d\mu \end{aligned}$$

### 2.3.2 Definición de función localmente integrable

Sea  $f : A \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ . Diremos que “ $f$  es localmente integrable en  $A$ ” si  $f \in \mathcal{R}([a, b])$  para todo  $[a, b] \subseteq A$ . En tal caso, lo denotaremos como  $f \in \mathcal{R}^l(A)$ .

Sean  $-\infty < a < b < +\infty$ , hay cuatro casos básicos:

$$f \in \mathcal{R}([a, +\infty)) \quad f \in \mathcal{R}((-\infty, b]) \quad f \in \mathcal{R}([a, b]) \quad f \in \mathcal{R}((a, b])$$

Por ejemplo, para el primer caso, diremos que  $\int_a^\infty f$  es...

i) Convergente, si  $\exists \lim_{x \rightarrow \infty} \int_a^x f = l \in \mathbb{R}$ .

ii) Divergente, si  $\exists \lim_{x \rightarrow \infty} \int_a^x f \in \{+\infty, -\infty\}$ .

iii) Oscilante, si Convergente, si  $\nexists \lim_{x \rightarrow \infty} \int_a^x f$ .

Podemos extender estas definiciones para el resto de casos de manera análoga.

### 2.3.3 Medibilidad de funciones localmente integrables

Sea  $f \in \mathcal{R}([a, +\infty))$  (o cualquier caso anterior); entonces,  $f$  es  $\mu_1$ -medible.

#### Demostración:

Por hipótesis,  $\forall n \in \mathbb{N}$  tenemos que  $f \in \mathcal{R}([a, a+n])$ . Aplicando el resultado 2.3.1, tenemos que  $f$  es medible en  $([a, a+n], \mathfrak{M}_1([a, +n]), \mu_1|_{\mathfrak{M}_1([a, a+n])})$ . Esto a su vez equivale a  $f \cdot X_{[a, a+n]}$  medible en  $(\mathbb{R}, \mathfrak{M}_1, \mu_1)$ . Finalmente, como el límite puntual respeta la medibilidad, basta ver que:

$$f \cdot X_{[a, a+n]} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} f \cdot X_{[a, +\infty)}$$

### 2.3.4 Integral de Lebesgue e integral impropia de Riemann

En las siguientes condiciones, la integral de Lebesgue es equivalente a la integral impropia de Riemann:

i)  $f \geq 0 \Rightarrow \int_a^\infty f = \int_{[a, +\infty)} f d\mu_1$ .

$$ii) \int_a^\infty |f| < \infty \Rightarrow \int_a^\infty f = \int_{[a,+\infty)} f d\mu_1.$$

**Demostración:**

i) Al ser  $f \geq 0$ , podemos garantizar  $\exists \lim_{x \rightarrow \infty} \int_a^x f \in [0, +\infty]$  pues no puede oscilar. Aplicando la caracterización sucesional del límite, tenemos:

$$\begin{aligned} \int_a^\infty f &= \lim_n \int_a^x f = \lim_n \int_a^{a+n} f \stackrel{2.3.1}{=} \lim_n \int_{[a,a+n]} f d\mu_1 = \lim_n \int_{[a,+\infty)} f \cdot X_{[a,a+n]} d\mu_1 \stackrel{TCM}{=} \\ &= \int_{[a,+\infty)} \lim_n f \cdot X_{[a,a+n]} d\mu_1 = \int_{[a,+\infty)} f d\mu_1 \end{aligned}$$

ii) Supongamos que  $\exists \int_a^\infty f < \infty \Rightarrow \exists \int_a^\infty f < \infty$ . Aplicando el apartado

anterior,

$$\exists \int_{[a,+\infty)} |f| d\mu_1 = \int_a^\infty |f| < \infty \Rightarrow |f|, f \in \mathcal{L}_1([a, +\infty))$$

Por definición de  $\mathcal{L}_1([a, +\infty))$ ,  $\exists \int_{[a,+\infty)} f d\mu_1 \in \mathbb{R}$ . Ahora, aplicando la caracterización sucesional del límite y el Teorema de la Convergencia Dominada:

$$\begin{aligned} \int_a^\infty f &= \lim_{x \rightarrow \infty} \int_a^x f = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_a^{a+n} f \stackrel{2.3.1}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{[a,a+n]} f d\mu_1 = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{[a,+\infty)} f \cdot X_{[a,a+n]} d\mu_1 \stackrel{TCMD}{=} \\ &= \int_{[a,+\infty)} \lim_{n \rightarrow \infty} f \cdot X_{[a,a+n]} d\mu_1 = \int_{[a,+\infty)} f d\mu_1 \end{aligned}$$

### 2.3.5 Ejemplo de no equivalencia

Veamos que no siempre se da la equivalencia. Por ejemplo, para la siguiente función  $f$ :

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \cdot \frac{1}{n} \cdot X_{[n-1,n)}(x)$$



Veamos que  $f$  no cumple ninguna de las hipótesis del resultado anterior:

$$\int_0^\infty f = \sum_{n=1}^\infty \frac{(-1)^{n+1}}{n} < \infty \qquad \int_0^\infty |f| = \sum_{n=1}^\infty \frac{1}{n} = \infty$$

Tenemos que  $f$  no es no negativa, y que  $|f| \notin \mathcal{L}_1$ . Veamos que  $f$  no es integrable Lebesgue a pesar de sí ser integrable Riemann (impropiamente):

$$\int_0^\infty f^+ = \sum_{n=1}^\infty \frac{1}{2n-1} = \infty \qquad \int_0^\infty f^- = \sum_{n=1}^\infty \frac{1}{2n} = \infty$$

### 2.3.6 Definición de integral impropia de Lebesgue

Si  $f : [a, +\infty) \longrightarrow \overline{\mathbb{R}}$  cumple  $f \notin \mathcal{L}_1([a, +\infty))$  pero  $f \in \mathcal{L}_1([a, x]) \forall x \in (a, \infty)$ . Entonces,  $f$  es medible en  $[a, \infty)$ . Se dice que  $f$  es impropriamente integrable en el sentido de Lebesgue sobre  $[a, \infty)$  si:

$$\exists \lim_{x \rightarrow \infty} \int_{[a, x]} f d\mu_1 = l \in \overline{\mathbb{R}} \qquad \text{en tal caso, se denota } \int_{[a, +\infty)} f d\mu_1 = l$$

En el ejemplo anterior,  $f$  no es integrable en el sentido usual. Veamos que sí lo es en el impropio:

### 2.3.7 Derivación bajo el signo integral

Sea  $(X, \Sigma, \mu)$  un espacio de medida. Sea  $E \in \Sigma$ . Sea  $f : E \times I \longrightarrow \mathbb{R}$  una función con  $I \subseteq \mathbb{R}$  un intervalo tal que  $\forall t \in I$   $f(\cdot, t) \in \mathcal{L}_1(E)$  para:

$$f(\cdot, t) : E \longrightarrow \mathbb{R} \qquad x \longmapsto f(\cdot, t)(x) = f(x, t)$$

Si existe  $\frac{\partial f}{\partial t} : E \times I \longrightarrow \mathbb{R}$  y además existe también  $\phi \in \mathcal{L}_1(E)$  tal que

$$\left| \frac{\partial f}{\partial t}(x, t) \right| \leq \phi(x) \quad \forall (x, t) \in (E, I)$$

Entonces, sea  $t_0 \in I$ , se cumple:

$$\exists \frac{df}{dt} \int_E f(\cdot, t_0)(x) d\mu(x) = \int_E \frac{\partial f}{\partial t}(x, t_0) d\mu(x)$$

**Notación:** Cuando operemos con una función que tenga como argumento más de una variable, integrando una de ellas y dejando las demás constantes, usaremos  $d\mu(x)$  para referirnos a la variable sobre la que integramos. Por ejemplo, en  $\int_E g(x, t) d\nu(x)$  se integra solo sobre  $x$ , dejando  $t$  fija.

**Demostración:**

Fijamos  $t_0 \in I$  cualquiera. Por definición de derivada, sea  $(t_n)_{n \in \mathbb{N}} \subseteq I \setminus \{t_0\}$  con  $t_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} t_0$ , se tiene:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_E f(x, t_n) d\mu(x) - \int_E f(x, t_0) d\mu(x)}{t_n - t_0} = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_E \frac{f(x, t_n) - f(x, t_0)}{t_n - t_0} = (*)$$

Aplicamos el Teorema del Valor Medio de derivación a  $I_{t_n, t_0}$  (intervalo de extremos  $t_n$  y  $t_0$ ). Como consecuencia,  $\exists \xi_n \in I_{t_n, t_0} \subseteq I$  tal que:

$$(*) = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_E \frac{\partial f}{\partial t}(x, \xi_n) d\mu$$

Por hipótesis, sabemos que:

$$\forall x \in E : \left| \frac{f(x, t_n) - f(x, t_0)}{t_n - t_0} \right| = \left| \frac{\partial f}{\partial t}(x, \xi_n) \right| \leq \varphi(x)$$

Luego estamos en condiciones de aplicar el Teorema de la Convergencia Dominada:

$$(*) = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_E \frac{f(x, t_n) - f(x, t_0)}{t_n - t_0} d\mu(x) = \int_E \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(x, t_n) - f(x, t_0)}{t_n - t_0} d\mu = \int_E \frac{\partial f}{\partial t}(x, t_0) d\mu(x)$$

### 2.3.8 Integrales de funciones de componentes en $\mathbb{R}^2$

Sea  $\Omega \subseteq \mathbb{R}^2$  un abierto. Sea  $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  con  $f \in \mathcal{C}^1(\Omega)$ . Sea  $I \subseteq \mathbb{R}$  un intervalo no degenerado. Sean  $a, b : I \rightarrow \mathbb{R}$  funciones derivables en  $I$  tales que  $\forall t \in I$  se cumplen las dos siguientes condiciones:

$$a(t) \leq b(t) \quad \{t\} \times [a(t), b(t)] \subseteq \Omega$$

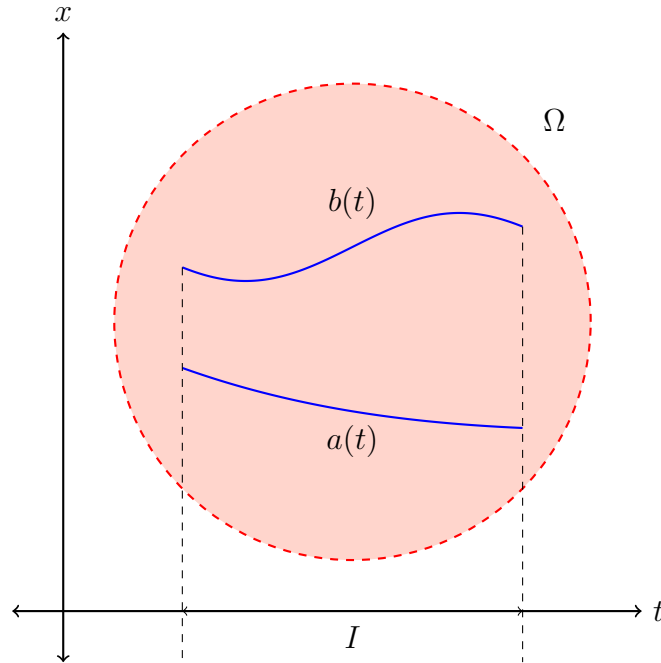
Definimos la siguiente función:

$$F : I \rightarrow \overline{\mathbb{R}} \quad t \mapsto F(t) = \int_{a(t)}^{b(t)} f(t, x) dx$$

Entonces, para todo  $t \in I$  se cumple:

$$\exists F'(t) = f(t, b(t)) \cdot b'(t) - f(t, a(t)) \cdot a'(t) + \int_{a(t)}^{b(t)} \frac{\partial f}{\partial t}(t, x) dx$$

**Demostración:** Comencemos ilustrando lo que estamos haciendo:



Fijamos  $t_0 \in I$  cualquiera. La función  $F(t)$  “recorre” la variable  $x$  integrando  $f$  entre  $a(t_0)$  y  $b(t_0)$ . Comencemos con la demostración.

Sea  $(t_n)_{n \in \mathbb{N}} \subseteq I \setminus \{t_0\}$  con  $t_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} t_0$ . Escribiremos la expresión de  $F'(t_0)$  sin llegar todavía a tomar límites:

$$\begin{aligned} \frac{F(t_n) - F(t_0)}{t_n - t_0} &= \frac{1}{t_n - t_0} \left( \int_{a(t_n)}^{b(t_n)} f(t_n, x) dx - \int_{a(t_0)}^{b(t_0)} f(t_0, x) dx \right) = \\ &= \frac{1}{t_n - t_0} \left( \int_{a(t_n)}^{b(t_n)} f(t_n, x) dx - \int_{a(t_n)}^{b(t_0)} f(t_n, x) dx + \int_{a(t_n)}^{b(t_0)} f(t_n, x) dx - \right. \\ &\quad \left. - \int_{a(t_0)}^{b(t_0)} f(t_n, x) dx + \int_{a(t_0)}^{b(t_0)} f(t_n, x) dx - \int_{a(t_0)}^{b(t_0)} f(t_0, x) dx \right) = \\ &= \frac{1}{t_n - t_0} \left( \int_{b(t_0)}^{b(t_n)} f(t_n, x) dx - \int_{a(t_0)}^{a(t_n)} f(t_n, x) dx - \int_{a(t_0)}^{b(t_0)} f(t_n, x) - f(t_0, x) dx \right) = (*) \end{aligned}$$

Aplicando el Teorema del Valor Medio de Integración, existen  $\xi_n \in I_{b(t_n), b(t_0)}$  y  $\zeta_n \in I_{a(t_n), a(t_0)}$  tales que:

$$(*) = f(t_n, \xi_n) \cdot \frac{b(t_n) - b(t_0)}{t_n - t_0} - f(t_n, \zeta_n) \cdot \frac{a(t_n) - a(t_0)}{t_n - t_0} + \int_{a(t_0)}^{b(t_0)} \frac{f(t_n, x) - f(t_0, x)}{t_n - t_0} dx$$

Por ser  $a$  y  $b$  derivables, tomando límites en los dos primeros sumandos:

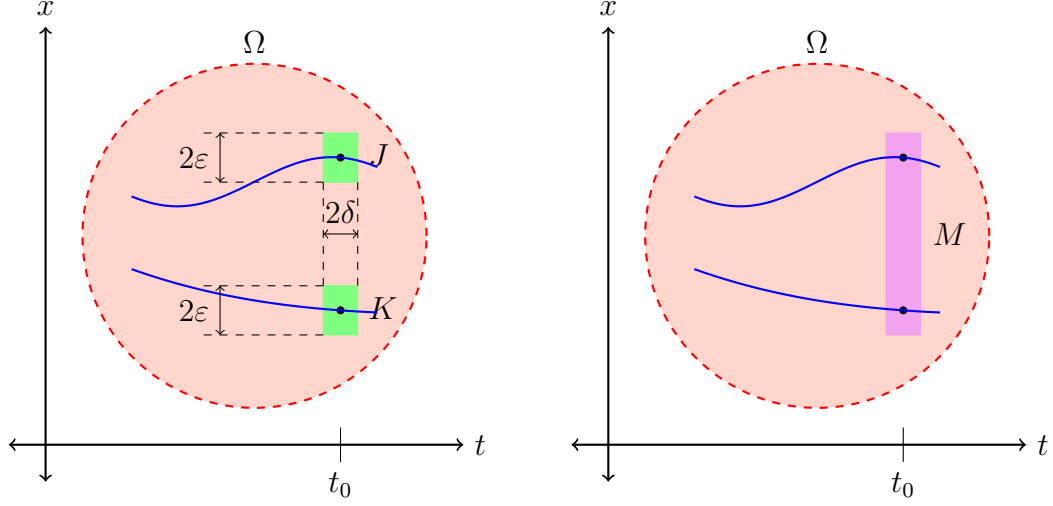
$$\lim_{n \rightarrow \infty} f(t_n, \xi_n) \cdot \frac{b(t_n) - b(t_0)}{t_n - t_0} - f(t_n, \zeta_n) \cdot \frac{a(t_n) - a(t_0)}{t_n - t_0} = f(t_0, b(t_0)) \cdot b'(t_0) - f(t_0, a(t_0)) \cdot a'(t_0)$$

Por el Teorema del Valor Medio de Derivación, sabemos que existe  $\theta_n \in I_{t_n, t_0}$  tal que  $\frac{f(t_n, x) - f(t_0, x)}{t_n - t_0} = \frac{\partial f}{\partial t}(\theta_n, x)$ . Además, por ser  $\Omega$  un abierto con  $f$  continua en él, podemos afirmar que existen  $\varepsilon > 0$ ,  $\delta > 0$  tales que:

$$J := [t_0 - \delta, t_0 + \delta] \times [a(t_0) - \varepsilon, a(t_0) + \varepsilon] \subseteq \Omega$$

$$K := [t_0 - \delta, t_0 + \delta] \times [b(t_0) - \varepsilon, b(t_0) + \varepsilon] \subseteq \Omega$$

Así, sea  $t \in [t_0 - \delta, t_0 + \delta]$ , tenemos que  $a(t) \in [a(t_0) - \varepsilon, a(t_0) + \varepsilon]$  y  $b(t) \in [b(t_0) - \varepsilon, b(t_0) + \varepsilon]$ . Definimos  $M := [t_0 - \delta, t_0 + \delta] \times [a(t_0) - \varepsilon, b(t_0) + \varepsilon]$ . Veamos qué papel juegan estos conjuntos en nuestro esquema anterior:



Tenemos que  $M$  es compacto por definición. Además, como  $f \in \mathcal{C}^1(\Omega)$  por hipótesis, podemos garantizar que:

$$\exists m := \max \left\{ \left| \frac{\partial f}{\partial t}(x, t) \right| : (x, t) \in M \right\}$$

De este modo, estamos en condiciones de aplicar el Teorema de la Convergencia Dominada. Por todo lo anterior,

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} f(t_n, \xi_n) \cdot \frac{b(t_n) - b(t_0)}{t_n - t_0} - f(t_n, \zeta_n) \cdot \frac{a(t_n) - a(t_0)}{t_n - t_0} + \int_{a(t_0)}^{b(t_0)} \frac{f(t_n, x) - f(t_0, x)}{t_n - t_0} dx = \\ = f(t_0, b(t_0)) \cdot b'(t_0) - f(t_0, a(t_0)) \cdot a'(t_0) + \int_{a(t_0)}^{b(t_0)} \frac{\partial f}{\partial t}(x, t_0) dx \end{aligned}$$

## §4. Cálculo de la integral de Lebesgue en $\mathbb{R}^N$

### 2.4.1 Notación y conceptos iniciales

$\mathbb{R}^{p+q} = \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q$  con  $p, q \in \mathbb{N}$ . Así, si  $x \in \mathbb{R}^p$  con  $y \in \mathbb{R}^q$ ; entonces,  $(x, y) \in \mathbb{R}^{p+q}$ .

Sea  $E \subseteq \mathbb{R}^{p+q}$ , sea  $x \in \mathbb{R}^p$ . Definimos la sección de  $E$  por  $x$  como el conjunto:

$$E_x = \left\{ y \in \mathbb{R}^q : (x, y) \in E \right\}$$

De manera similar, sea  $y \in \mathbb{R}^q$ , definimos la sección de  $E$  por  $y$  como:

$$E_y = \left\{ x \in \mathbb{R}^p : (x, y) \in E \right\}$$

Sea  $f : \mathbb{R}^{p+q} \longrightarrow \overline{\mathbb{R}}$   $(x, y) \longmapsto f(x, y)$ . Definimos la sección de  $f$  por  $x \in \mathbb{R}^p$  y la sección de  $f$  por  $y \in \mathbb{R}^q$  (respectivamente) como las dos siguientes funciones:

$$\begin{array}{ll} f_x : \mathbb{R}^q \longrightarrow \overline{\mathbb{R}} & f_y : \mathbb{R}^p \longrightarrow \overline{\mathbb{R}} \\ x \longmapsto f(x, y) & y \longmapsto f(x, y) \end{array}$$

### 2.4.2 Propiedades de las secciones

Sea  $f : \mathbb{R}^{p+q} \longrightarrow \overline{\mathbb{R}}$ . Sean  $\{E\} \cup \{E^i\}_{i \in \mathbb{N}} \subseteq \mathbb{R}^{p+q}$ . Sean  $x \in \mathbb{R}^p, y \in \mathbb{R}^q$ . Entonces, se cumplen los siguientes enunciados:

$$\begin{array}{ll} \text{i)} (f^+)_x = (f_x)^+ & \text{i')} (f^+)_y = (f_y)^+ \\ \text{ii)} (f^-)_x = (f_x)^- & \text{ii')} (f^-)_y = (f_y)^- \\ \text{iii)} \left( \bigcup_{i \in \mathbb{N}} E^i \right)_x = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} E_x^i & \text{iii')} \left( \bigcup_{i \in \mathbb{N}} E^i \right)_y = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} E_y^i \\ \text{iv)} \left( \bigcap_{i \in \mathbb{N}} E^i \right)_x = \bigcap_{i \in \mathbb{N}} E_x^i & \text{iv')} \left( \bigcap_{i \in \mathbb{N}} E^i \right)_y = \bigcap_{i \in \mathbb{N}} E_y^i \\ \text{v)} (\mathbb{R}^{p+q} \setminus E)_x = \mathbb{R}^q \setminus E_x. & \text{v')} (\mathbb{R}^{p+q} \setminus E)_y = \mathbb{R}^p \setminus E_y. \end{array}$$

**Demostración:** Las demostraciones  $(*)'$  son análogas al resto.

$$i) (f_x)^+(y) = \max\{f_x(y), 0\} = \max\{f(x, y), 0\} = f^+(x, y) = (f^+)_x(y).$$

ii)  $(f_x)^-(y) = \max\{-f_x(y), 0\} = \max\{-f(x, y), 0\} = f^-(x, y) = (f^-)_x(y)$ .

iii) Veamos que  $(\bigcup_{i \in \mathbb{N}} E^i)_y = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} E_y^i$  por doble contenido:

$\subseteq$  Si  $y \in (\bigcup_{i \in \mathbb{N}} E^i)_x$ , tenemos  $(x, y) \in \bigcup_{i \in \mathbb{N}} E^i$  luego  $\exists j \in \mathbb{N}$  tal que  $(x, y) \in E_j$ .

Por tanto,  $y \in E_x^j \subseteq \bigcup_{i \in \mathbb{N}} E_x^i$ .

$\supseteq$  Si  $y \in \bigcup_{i \in \mathbb{N}} E_x^i$ , tenemos  $\exists j \in \mathbb{N}$  tal que  $y \in E_x^j$ . Así,  $(x, y) \in E^j \subseteq \bigcup_{i \in \mathbb{N}} E^i$ .

Por tanto,  $y \in (\bigcup_{i \in \mathbb{N}} E^i)_x$ .

iv) Lo veremos por la definición del conjunto. Como  $y$  es un punto fijo de  $\mathbb{R}^q$  (dado por el enunciado), usaremos  $z$  como variable genérica de  $\mathbb{R}^q$ .

$$(\bigcap_{i \in \mathbb{N}} E^i)_x = \left\{ z \in \mathbb{R}^q : (x, z) \in \bigcap_{i \in \mathbb{N}} E^i \right\} = \bigcap_{i \in \mathbb{N}} \left\{ z \in \mathbb{R}^q : (x, z) \in E^i \right\} = \bigcap_{i \in \mathbb{N}} E_x^i$$

v) Veamos que  $(\mathbb{R}^{p+q} \setminus E)_x = \mathbb{R}^q \setminus E_x$  por doble contenido:

$\subseteq$  Si  $y \in (\mathbb{R}^{p+q} \setminus E)_x$ , tenemos  $(x, y) \in \mathbb{R}^{p+q} \setminus E$  luego  $(x, y) \notin E$ .

Por tanto,  $y \notin \{z \in \mathbb{R}^q : (x, z) \in E\} = E_x$  luego  $y \in \mathbb{R}^q \setminus E_x$ .

$\supseteq$  Si  $y \in \mathbb{R}^q \setminus E_x$ , tenemos  $y \notin \{z \in \mathbb{R}^q : (x, z) \in E\} = E_x$ .

Por tanto,  $(x, y) \notin E$  luego  $(x, y) \in \mathbb{R}^{p+q} \setminus E$  y por tanto  $y \in (\mathbb{R}^{p+q} \setminus E)_x$ .

**Nota:** A partir de los apartados (iii), (iv), (iii') y (iv') se deducen los siguientes para  $E, F \in \mathbb{R}^{p+q}$  cualesquiera:

$$v) (E \setminus F)_x = E_x \setminus F_x \qquad v') (E \setminus F)_y = E_y \setminus F_y$$

### 2.4.3 Teorema de anomalías de conjuntos medibles

Sea  $E \in \mathfrak{M}_{p+q}$ . Se cumplen los siguientes enunciados:

$$\begin{array}{ll} \text{a) } \exists A \in \mathfrak{M}_p \text{ con } \mu_p(A) = 0 \text{ que verifica:} & \text{a') } \exists B \in \mathfrak{M}_q \text{ con } \mu_q(B) = 0 \text{ que verifica:} \\ \forall x \in \mathbb{R}^p \setminus A : E_x \in \mathfrak{M}_q & \forall y \in \mathbb{R}^q \setminus B : E_y \in \mathfrak{M}_p \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{b) La siguiente función es } \mu_p\text{-medible:} & \text{b') La siguiente función es } \mu_q\text{-medible:} \\ \varphi : \mathbb{R}^p \setminus A \rightarrow \mathbb{R} \quad x \mapsto \varphi(x) = \mu_q(E_x) & \psi : \mathbb{R}^q \setminus B \rightarrow \mathbb{R} \quad y \mapsto \psi(y) = \mu_p(E_y) \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{c) Medida por secciones en } x: & \text{c') Medida por secciones en } y: \\ \int_{\mathbb{R}^p \setminus A} \varphi(x) d\mu_p(x) = \mu_{p+q}(E) & \int_{\mathbb{R}^q \setminus B} \psi(y) d\mu_q(y) = \mu_{p+q}(E) \end{array}$$

**Demostración:** Veremos solo los tres primeros apartados (los apartados' son análogos). Iremos estructurando la demostración por casos de complejidad incremental.

*i)* Para  $E$  un cubo acotado. Podemos expresar  $E = I \times J$  con  $I, J$  cubos acotados de  $\mathbb{R}^p$  y  $\mathbb{R}^q$ , respectivamente.

$$\text{a) Sea } x \in \mathbb{R}^p, E_x = \begin{cases} J & \text{si } x \in I \\ \emptyset & \text{si } x \notin I \end{cases} \quad \text{En cualquier caso, } E_x \in \mathfrak{M}_q$$

$$\text{b) } \varphi(x) = \begin{cases} \mu_q(J) & \text{si } x \in I \\ \mu_q(\emptyset) & \text{si } x \notin I \end{cases} = \mu_q(J) \cdot X_I(x) \quad \text{que es } \mu_p\text{-medible.}$$

$$\text{c) } \int_{\mathbb{R}^p} \varphi(x) d\mu_p(x) = \mu_q(J) \cdot \int_{\mathbb{R}^p} X_I(x) d\mu_p(x) = \mu_p(I) \cdot \mu_q(J) = \mu_{p+q}(E)$$



ii) Para  $E$  un abierto acotado. Sabemos que podemos expresar  $E = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} I^n$  donde los  $I_n$  son cubos diádicos disjuntos. Aplicando el apartado anterior a cada uno de ellos, sabemos que para  $x \in \mathbb{R}^p$  cualquiera, se tiene:

$$I_x^n \in \mathfrak{M}_q \quad \varphi_n(x) = \mu_q(I_x^n) \quad \mu_p\text{-medible} \quad \int_{\mathbb{R}^p} \varphi_n(x) d\mu_p(x) = \mu_{p+q}(I^n)$$

Veamos cómo demostrar el apartado (ii) en base a esta información:

$$\text{a) } E_x = \left( \bigcup_{n \in \mathbb{N}} I^n \right)_x \stackrel{2.4.2}{=} \bigcup_{n \in \mathbb{N}} I_x^n \in \mathfrak{M}_q \quad \text{Consideramos } A = \emptyset.$$

$$\text{b) } \varphi(x) = \mu_q(E_x) = \mu_q\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} I_x^n\right) = \sum_{n=1}^{\infty} \mu_q(I_x^n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \varphi_k(x) \quad \mu_q\text{-medible.}$$

$$\begin{aligned} \text{c) } \int_{\mathbb{R}^p} \varphi(x) d\mu_p(x) &= \int_{\mathbb{R}^p} \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_n(x) d\mu_p(x) \stackrel{TCM}{=} \sum_{n=1}^{\infty} \int_{\mathbb{R}^p} \varphi_n d\mu_p(x) = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \mu_{p+q}(I^n) = \mu_{p+q}\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} I^n\right) = \mu_{p+q}(E) \end{aligned}$$

iii) Para  $E = \bigcap_{n \in \mathbb{N}} O^n$  intersección de abiertos decrecientes. Aplicando el apartado anterior, sabemos que para  $x \in \mathbb{R}^p$  cualquiera se cumple:

$$O_x^n \in \mathfrak{M}_q \quad \varphi_n(x) = \mu_q(O_x^n) \quad \mu_p\text{-medible} \quad \int_{\mathbb{R}^p} \varphi_n(x) d\mu_p(x) = \mu_{p+q}(O^n)$$

Demostraremos el apartado (iii) con esta información:

$$\text{a) } E_x = \left( \bigcap_{n \in \mathbb{N}} O^n \right)_x \stackrel{2.4.2}{=} \bigcap_{n \in \mathbb{N}} O_x^n \in \mathfrak{M}_q \quad \text{Consideramos } A = \emptyset.$$

$$\text{b) } \varphi(x) = \mu_q(E_x) = \mu_q\left(\bigcap_{n \in \mathbb{N}} O_x^n\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu_q(O_x^n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \varphi_n(x) \quad \mu_q\text{-medible}$$

$$\begin{aligned} \text{c) } \int_{\mathbb{R}^p} \varphi(x) d\mu_p(x) &= \int_{\mathbb{R}^p} \lim_{n \rightarrow \infty} \varphi_n(x) d\mu_p(x) \stackrel{TC D}{=} \varphi_1 \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{\mathbb{R}^p} \varphi_n d\mu_p(x) = \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \mu_{p+q}(O^n) = \mu_{p+q}(E) \end{aligned}$$

iv)  $E \in \mathfrak{M}_{p+q}$  con  $\mu_{p+q}(E) = 0$ . Por la caracterización topológica de los conjuntos medibles, sabemos que existen  $\{O^n\}_{n \in \mathbb{N}} \subseteq \tau_{\mathbb{R}^{p+q}}$  con  $E \subseteq O^{n+1} \subseteq O^n$  y tales que  $\mu_{p+q}(O^n) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$ . De este modo, tenemos  $E \subseteq N := \bigcap_{n \in \mathbb{N}} O^n \in \mathfrak{M}_{p+q}$ . Aplicando el apartado anterior a  $N$ , tenemos que para  $x \in \mathbb{R}^p$  se cumple:

$$N_x \in \mathfrak{M}_q \quad \varphi_1(x) = \mu_q(N_x) \quad \mu_p\text{-medible} \quad \int_{\mathbb{R}^p} \varphi_1(x) d\mu_p(x) = \mu_{p+q}(N) = 0$$

Al ser  $\varphi_1$  no negativa con integral nula, sabemos que  $\varphi_1 \stackrel{\mu\text{-a.e.}}{=} 0$  luego  $\exists A \in \mathfrak{M}_p$  con  $\mu_p(A) = 0$  tal que  $\{x \in \mathbb{R}^p : \varphi_1(x) \neq 0\} \subseteq A$ . Sea este el conjunto de anomalías para este apartado, dado  $x \in \mathbb{R}^p \setminus A$ , se cumple:

a)  $E_x \subseteq N_x$  con  $\mu_q(E_x) \leq \mu_q(N_x) = \varphi_1(x) = 0$  luego  $E_x \in \mathfrak{M}_q$ .

b)  $\varphi(x) = \mu_q(E_x) = 0$   $\mu_q$ -medible trivialmente.

c)  $\int_{\mathbb{R}^p \setminus A} \varphi(x) d\mu_p(x) = \int_{\mathbb{R}^p \setminus A} 0 d\mu_p(x) = 0 = \mu_{p+q}(E)$

v) Para  $E \in \mathfrak{M}_{p+q}$  acotado. Por ser medible,  $E = G \setminus N$ , donde  $G$  es una intersección de abiertos decrecientes y  $N$  es un conjunto de medida nula. Al ser  $E$  acotado, también ha de serlo  $G$ , luego estamos en condiciones de aplicarle el apartado (iii). Así, para  $x \in \mathbb{R}^p$  se cumple:

$$G_x \in \mathfrak{M}_q \quad \varphi_1(x) = \mu_q(G_x) \quad \mu_p\text{-medible} \quad \int_{\mathbb{R}^p} \varphi_1(x) d\mu_p(x) = \mu_{p+q}(G)$$

Aplicando ahora el apartado (iv) a  $N$ , para  $x \in \mathbb{R}^p \setminus A$  se tiene:

$$N_x \in \mathfrak{M}_q \quad \varphi_2(x) = \mu_q(N_x) \quad \mu_p\text{-medible} \quad \int_{\mathbb{R}^p \setminus A} \varphi_2(x) d\mu_p(x) = \mu_{p+q}(N)$$

Consideramos este conjunto  $A$ . Así, dado  $x \in \mathbb{R}^p \setminus A$ , tenemos:

a)  $E_x \subseteq N_x$  con  $\mu_q(E_x) \leq \mu_q(N_x) = \varphi_1(x) = 0$  luego  $E_x \in \mathfrak{M}_q$ .

b)  $\varphi(x) = \mu_q(E_x) = \mu_q(G_x) - \mu_q(N_x) = \varphi_1(x) - \varphi_2(x)$   $\mu_q$ -medible.

c)  $\int_{\mathbb{R}^p \setminus A} \varphi(x) d\mu_p(x) = \int_{\mathbb{R}^p \setminus A} 0 d\mu_p(x) = 0 = \mu_{p+q}(E)$

vi)  $E \in \mathfrak{M}_{p+q}$  (caso general). Definimos  $E^n = E \cap [-n, n]^N$ . De este modo, es claro que  $E = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} E^n$  y que todos los  $E^n$  son acotados. Aplicando el apartado (v) a cada uno de ellos, tenemos que para  $x \in \mathbb{R}^p \setminus A^n$  se cumple:

$$E_x^n \in \mathfrak{M}_q \quad \varphi_n(x) = \mu_q(E_x^n) \quad \mu_p\text{-medible} \quad \int_{\mathbb{R}^p \setminus A^n} \varphi_1(x) d\mu_p(x) = \mu_{p+q}(E^n)$$

Consideramos el conjunto de anomalías  $A := \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A^n$  aplicando la subaditividad de la medida, es claro que  $\mu_{p+q}(A) = 0$ . Sea  $x \in \mathbb{R}^p \setminus A$ , se cumple:

$$\text{a) } E_x = \bigcup_{\substack{i \in \mathbb{N} \\ E_x^i \in \mathfrak{M}_q}} E_x^i \in \mathfrak{M}_q$$

$$\text{b) } \varphi(x) = \mu_q(E_x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu_q(E_x^n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \varphi_n(x) \quad \mu_q\text{-medible.}$$

$$\begin{aligned} \text{c) } \int_{\mathbb{R}^p \setminus A} \varphi(x) d\mu_p(x) &= \int_{\mathbb{R}^p \setminus A} \lim_{n \rightarrow \infty} \varphi_n(x) d\mu_p(x) \stackrel{TCM}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{\mathbb{R}^p \setminus A} \varphi_n(x) d\mu_p(x) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \mu_{p+q}(E^n) = \mu_{p+q}(E) \end{aligned}$$

#### 2.4.4 Teorema de Tonelli

Sea  $f : \mathbb{R}^{p+q} \rightarrow [0, +\infty]$  una función  $\mu_{p+q}$ -medible. Tenemos:

$$\text{a) } \exists A \in \mathfrak{M}_q \text{ con } \mu_p(A) = 0 \text{ que verifica:} \quad \text{a') } \exists B \in \mathfrak{M}_p \text{ con } \mu_q(B) = 0 \text{ que verifica:}$$

$$\forall x \in \mathbb{R}^p \setminus A \quad f_x \text{ es } \mu_q\text{-medible} \quad \forall y \in \mathbb{R}^q \setminus B \quad f_y \text{ es } \mu_p\text{-medible}$$

$$\text{b) La siguiente función } \varphi : \mathbb{R}^p \setminus A \rightarrow [0, +\infty] \quad \text{b') La siguiente función } \psi : \mathbb{R}^q \setminus B \rightarrow [0, +\infty]$$

$$x \mapsto \int_{\mathbb{R}^q} f_x(y) d\mu_q(y) \quad \text{es } \mu_p\text{-medible} \quad y \mapsto \int_{\mathbb{R}^p} f_y(x) d\mu_p(x) \quad \text{es } \mu_q\text{-medible}$$

$$\text{c) Integración por secciones:}$$

$$\int_{\mathbb{R}^p \setminus A} \varphi(x) d\mu_p(x) = \int_{\mathbb{R}^{p+q}} f(x, y) d\mu_{p+q}(x, y)$$

$$\text{c') Integración por secciones:}$$

$$\int_{\mathbb{R}^q \setminus B} \psi(y) d\mu_q(y) = \int_{\mathbb{R}^{p+q}} f(x, y) d\mu_{p+q}(x, y)$$

Por tanto, ha de cumplirse:

$$\int_{\mathbb{R}^p} \left( \int_{\mathbb{R}^q} f(x, y) d\mu_q(y) \right) d\mu_p(x) = \int_{\mathbb{R}^{p+q}} f(x, y) d\mu_{p+q}(x, y) = \int_{\mathbb{R}^q} \left( \int_{\mathbb{R}^p} f(x, y) d\mu_p(x) \right) d\mu_q(y)$$

**Demostración:** Al igual que con el caso anterior; dividiremos la demostración en casos, y no se demostrarán los apartados' al ser análogos.

i) Consideramos  $f = X_E$  para cierto  $E \in \mathfrak{M}_{p+q}$ . Se corresponde con el teorema anterior. Así, para el correspondiente conjunto de anomalías  $A \in \mathfrak{M}_{p+q}$  con  $\mu_{p+q}(A) = 0$  fijado, tenemos:

$$\text{a) } f_x = (X_E)_x = x_{E_x} \mu_q\text{-medible al ser } E_x \in \mathfrak{M}_q$$

$$\text{b) } \varphi(x) = \int_{\mathbb{R}^q} X_{E_x}(y) d\mu_q(y) = \mu_q(E_x) \text{ medible por el teorema anterior}$$

$$\text{c) } \int_{\mathbb{R}^p \setminus A} \varphi(x) d\mu_p(x) = \mu_{p+q}(E) = \int_{\mathbb{R}^{p+q}} \underbrace{X_E(x, y)}_{f(x, y)} d\mu_{p+q}(x, y)$$

ii) Sea  $f = \sum_{i=1}^k \lambda_i \cdot X_{E^i}$  función simple y medible dada por su expresión canónica. Aplicando el apartado anterior a cada  $E^i$ , tenemos que  $\exists A_i \in \mathfrak{M}_{p+q}$  con  $\mu_{p+q}(A_i) = 0$  tal que  $\forall x \in \mathbb{R}^p \setminus A_i$  se cumple:

$$(X_{E^i})_x \mu_q\text{-medible} \quad \varphi_i(x) = \int_{\mathbb{R}^q} X_{E_x^i}(y) d\mu_q(y) \text{ es } \mu_q\text{-medible}$$

$$\int_{\mathbb{R}^p \setminus A_i} \varphi_i(x) d\mu_p(x) = \int_{\mathbb{R}^{p+q}} X_{E^i}(x, y) d\mu_{p+q}(x, y)$$

Consideramos  $A = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} A_i \in \mathfrak{M}_p$ , que cumple  $\mu_p(A) = 0$  por subaditividad. Así, dado  $x \in \mathbb{R}^p \setminus A$ , se cumple:

$$\text{a) } f_x = \sum_{i=1}^k \lambda_i \cdot \underbrace{X_{E^i}}_{\mu_q\text{-medible}} \mu_q\text{-medible}$$

$$\begin{aligned}
\text{b) } \varphi(x) &= \int_{\mathbb{R}^q} \sum_{i=1}^k \lambda_i \cdot X_{E_x^i}(y) d\mu_q(y) = \sum_{i=1}^k \lambda_i \cdot \left( \int_{\mathbb{R}^q} X_{E_x^i}(y) d\mu_q(y) \right) = \\
&= \sum_{i=1}^k \lambda_i \cdot \underbrace{\varphi_i(x)}_{\mu_p\text{-medible}} \quad \mu_p\text{-medible}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{c) } \int_{\mathbb{R}^p \setminus A} \varphi(x) d\mu_p(x) &= \sum_{i=1}^k \lambda_i \cdot \int_{\mathbb{R}^p \setminus A} \varphi_i(x) d\mu_p(x) = \sum_{i=1}^k \lambda_i \cdot \int_{\mathbb{R}^p \setminus A_i} \varphi_i(x) d\mu_p(x) = \\
&= \sum_{i=1}^k \lambda_i \cdot \mu_{p+q}(E^i) = \int_{\mathbb{R}^{p+q}} f(x, y) d\mu_{p+q}(x, y)
\end{aligned}$$

*iii)*  $f$   $\mu_{p+q}$ -medible (caso general). Sabemos que existe una sucesión de funciones medibles y simples  $(s_n)_{n \in \mathbb{N}}$  tales que  $0 \leq s_n \leq s_{n+1} \leq f$  que converge puntualmente a  $f$ . Aplicando el apartado anterior a cada  $s_n$ , tenemos que  $\exists A_n \in \mathfrak{M}_p$  con  $\mu_p(A_n) = 0$  tal que para cualquier  $x \in \mathbb{R}^p \setminus A_n$  se cumple:

$$(s_n)_x \text{ } \mu_q\text{-medible} \quad \varphi_n(x) = \int_{\mathbb{R}^q} s_{n_x}(y) d\mu_q(y) \text{ es } \mu_q\text{-medible}$$

$$\int_{\mathbb{R}^p \setminus A_n} \varphi_n(x) d\mu_p(x) = \int_{\mathbb{R}^{p+q}} s_n(x, y) d\mu_{p+q}(x, y)$$

Consideramos  $A = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathfrak{M}_p$ , que cumple  $\mu_p(A) = 0$  por subaditividad. Así, dado  $x \in \mathbb{R}^p \setminus A$ , se cumple:

$$\text{a) } f_x = \lim_{n \rightarrow \infty} \underbrace{s_{n_x}}_{\mu_q\text{-medible}} \quad \mu_q\text{-medible}$$

$$\text{b) } \varphi(x) = \int_{\mathbb{R}^q} \lim_{n \rightarrow \infty} s_{n_x}(y) d\mu_q(y) \stackrel{TCM}{=} \underbrace{\lim_{n \rightarrow \infty} \int_{\mathbb{R}^q} s_{n_x}(y) d\mu_q(y)}_{\varphi_n(x) \text{ } \mu_p\text{-medible}} \quad \mu_p\text{-medible}$$

$$\text{c) } \int_{\mathbb{R}^p \setminus A} \varphi(x) d\mu_p(x) = \int_{\mathbb{R}^p \setminus A} \lim_{n \rightarrow \infty} \varphi_n(x) d\mu_p(x) \stackrel{TCM}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{\mathbb{R}^p \setminus A} \varphi_n(x) d\mu_p(x) =$$

$$\begin{aligned}
&= \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{\mathbb{R}^p \setminus A_n} \varphi_n(x) d\mu_p(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{\mathbb{R}^{p+q}} s_n(x, y) d\mu_{p+q}(x, y) \stackrel{TCM}{=} \\
&= \int_{\mathbb{R}^{p+q}} \lim_{n \rightarrow \infty} s_n(x, y) d\mu_{p+q}(x, y) = \int_{\mathbb{R}^{p+q}} f(x, y) d\mu_{p+q}(x, y)
\end{aligned}$$

### 2.4.5 Teorema de Fubini

Dada cualquier función  $f \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^{p+q})$ , se cumplen los siguientes enunciados:

- a)  $\exists A \in \mathfrak{M}_p$  con  $\mu_p(A) = 0$  que verifica  $\forall x \in \mathbb{R}^p \setminus A : f_x \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^q)$       a')  $\exists B \in \mathfrak{M}_q$  con  $\mu_q(B) = 0$  que verifica  $\forall y \in \mathbb{R}^q \setminus B : f_y \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^p)$
- b) La siguiente función  $\varphi : \mathbb{R}^p \setminus A \rightarrow [0, +\infty]$   $x \mapsto \int_{\mathbb{R}^q} f_x(y) d\mu_q(y)$  es  $\mu_p$ -sumable      b') La siguiente función  $\psi : \mathbb{R}^q \setminus B \rightarrow [0, +\infty]$   $y \mapsto \int_{\mathbb{R}^p} f_y(x) d\mu_p(x)$  es  $\mu_q$ -sumable
- c) Integración por secciones:  $\int_{\mathbb{R}^p \setminus A} \varphi(x) d\mu_p(x) = \int_{\mathbb{R}^{p+q}} f(x, y) d\mu_{p+q}(x, y)$       c') Integración por secciones:  $\int_{\mathbb{R}^q \setminus B} \psi(y) d\mu_q(y) = \int_{\mathbb{R}^{p+q}} f(x, y) d\mu_{p+q}(x, y)$

Por tanto, ha de cumplirse:

$$\int_{\mathbb{R}^p} \left( \int_{\mathbb{R}^q} f(x, y) d\mu_q(y) \right) d\mu_p(x) = \int_{\mathbb{R}^{p+q}} f(x, y) d\mu_{p+q}(x, y) = \int_{\mathbb{R}^q} \left( \int_{\mathbb{R}^p} f(x, y) d\mu_p(x) \right) d\mu_q(y)$$

**Demostración:** Los apartados' son análogos.

En primer lugar, nótese que para  $x \in \mathbb{R}^p$  cualquiera se cumple:

$$f_x = (f_x)^+ - (f_x)^- = (f^+)_x - (f^-)_x \stackrel{\text{notación}}{=} f_x^+ - f_x^-$$

Aplicando el Teorema de Tonelli a  $f^+$ , obtenemos:

$$\begin{aligned} \exists A_1 \in \mathfrak{M}_p \text{ con } \mu_p(A_1) = 0 \text{ tal que } \forall x \in \mathbb{R}^p \setminus A_1, f_x^+ \text{ es } \mu_q\text{-medible.} \\ \varphi_1 : \mathbb{R}^p \setminus A_1 \rightarrow [0, +\infty] \text{ dada por } x \mapsto \int_{\mathbb{R}^q} f_x^+(y) d\mu_q(y) \text{ es } \mu_p\text{-medible.} \\ \int_{\mathbb{R}^p \setminus A_1} \varphi_1(x) d\mu_p(x) = \int_{\mathbb{R}^{p+q}} f^+(x, y) d\mu_{p+q}. \end{aligned}$$

Aplicamos ahora el Teorema de Tonelli a  $f^-$  y obtenemos:

$$\begin{aligned} \exists A_2 \in \mathfrak{M}_p \text{ con } \mu_p(A_2) = 0 \text{ tal que } \forall x \in \mathbb{R}^p \setminus A_2, f_x^- \text{ es } \mu_q\text{-medible.} \\ \varphi_2 : \mathbb{R}^p \setminus A_2 \rightarrow [0, +\infty] \text{ dada por } x \mapsto \int_{\mathbb{R}^q} f_x^-(y) d\mu_q(y) \text{ es } \mu_p\text{-medible.} \\ \int_{\mathbb{R}^p \setminus A_2} \varphi_2(x) d\mu_p(x) = \int_{\mathbb{R}^{p+q}} f^-(x, y) d\mu_{p+q}. \end{aligned}$$

Por hipótesis,  $f \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^{p+q})$ , luego  $f^+, f^- \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^{p+q})$  también. Por tanto, los siguientes conjuntos han de ser de medida nula:

$$A_3 := \{x \in \mathbb{R}^p \setminus A_1 : \varphi_1(x) = +\infty\} \quad A_4 := \{x \in \mathbb{R}^p \setminus A_2 : \varphi_2(x) = +\infty\}$$

Veamos cómo demostrar el teorema a partir de esta información:

a) Definimos  $A := A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_4 \in \mathfrak{M}_p$  con  $\mu_p(A) = 0$ .

Así, sea  $x \in \mathbb{R}^p \setminus A$ , se cumple  $\varphi_1(x) < \infty$ .

Por definición,  $\varphi_1(x) = \int_{\mathbb{R}^q} f_x^+(y) d\mu_q(y) < \infty$ . Así,  $f_x^+ \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^q)$  por definición.

Del mismo modo,  $\infty > \varphi_2(x) = \int_{\mathbb{R}^q} f_x^-(y) d\mu_q(y)$  luego  $f_x^- \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^q)$ .

Al ser  $\mathcal{L}_1(\mathbb{R}^q)$  un espacio vectorial, tenemos que  $f_x = f_x^+ - f_x^- \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^q)$ .

b) Sea  $x \in \mathbb{R}^p \setminus A$ , tenemos que

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= \int_{\mathbb{R}^q} f_x(y) d\mu_q(y) = \int_{\mathbb{R}^q} f_x^+(y) d\mu_q(y) - \int_{\mathbb{R}^q} f_x^-(y) d\mu_q(y) = \\ &= \underbrace{\varphi_1(x)}_{\in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^p \setminus A)} - \underbrace{\varphi_2(x)}_{\in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^p \setminus A)} \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R}^p \setminus A) \end{aligned}$$

$$\text{c) } \int_{\mathbb{R}^p \setminus A} \varphi(x) d\mu_p(x) = \int_{\mathbb{R}^p \setminus A} \varphi_1(x) d\mu_p(x) - \int_{\mathbb{R}^p \setminus A} \varphi_2(x) d\mu_p(x) =$$

$$= \int_{\mathbb{R}^{p+q}} f^+(x, y) d\mu_{p+q}(x, y) + \int_{\mathbb{R}^{p+q}} f^-(x, y) d\mu_{p+q}(x, y) = \int_{\mathbb{R}^{p+q}} f(x, y) d\mu_{p+q}(x, y)$$

### 2.4.6 Teorema de Cambio de Variable

Sea  $\Omega$  un abierto de  $\mathbb{R}^N$ . Sea  $T : \Omega \longrightarrow \mathbb{R}^N$  un difeomorfismo de clase  $\mathcal{C}^1(\Omega)$ . Sea  $f \in \mathcal{L}_1(T(\Omega))$  (alternativamente,  $f : T(\Omega) \longrightarrow [0, \infty]$  medible, pudiendo darse ambas). Entonces, se cumple:

$$\int_{T(\Omega)} f(y) d\mu_N(y) = \int_{\Omega} (f \circ T)(x) \cdot |\det J_T(x)| d\mu_N(x)$$

Con  $(f \circ T) \cdot |\det J_T| \in \mathcal{L}_1(\Omega)$  (alternativamente, no negativa y medible).

**Idea:** No se verá la demostración formal al ser demasiado larga.

Por ser  $T : \Omega \longrightarrow [0, +\infty]$  un difeomorfismo de clase  $\mathcal{C}^1(\Omega)$  con  $\Omega$  abierto, las derivadas parciales de orden 1 de  $T$  son continuas. Además,  $T$  es inyectiva, y para todo  $x \in \Omega$  se cumple  $\det J_T(x) \neq 0$ . De este modo, estamos en condiciones de aplicar el Teorema de la Función Inversa. Así,

$$T(\Omega) \text{ abierto de } \mathbb{R}^N \quad T^{-1} : T(\Omega) \longrightarrow \Omega \text{ difeomorfismo } \mathcal{C}^1(T(\Omega))$$

Consideraremos la siguiente notación:

$$\Omega \xrightarrow{T} T(\Omega) \quad x = (x_1, x_2, \dots, x_N) \xrightarrow{T} Tx = T(x) = (y_1, y_2, \dots, y_N)$$

$$Tx = (y_1(x), \dots, y_N(x)) \quad y_k = y_k(x_1, \dots, x_N) = \Pi_k(T(x)) \text{ k-ésima componente}$$

Como regla mnemotécnica, podemos considerar esta ilustración (no es para nada formal, simplemente es una práctica sugerida) para recordar de qué transformación es el jacobiano y sobre qué variables se debe integrar:

$$\int_{T(\Omega)} f(y_1, \dots, y_N) d\mu_N(y_1, \dots, y_N) =$$



$$\int_{\Omega} (f \circ T)(\underbrace{x_1, \dots, x_N}_{y_1, \dots, y_N}) \cdot \left| \frac{d(x_1, \dots, x_N)}{d(\underbrace{y_1, \dots, y_N}_{\frac{\partial y_k}{\partial x_j}})} \right| d\mu_N(x_1, \dots, x_N)$$

Buscamos que los diferenciales “se simplifiquen”.