



Universidad Politécnica  
de Madrid

**Escuela Técnica Superior de  
Ingenieros Informáticos**



Grado en «título del grado»

Trabajo Fin de Grado

**Título del Trabajo, con Mayúscula en  
Todas las Palabras que no Sean  
Conectivas (Artículos, Preposiciones,  
Conjunciones)**

Autor: «nombre y apellidos»

Tutor(a): «nombre y apellidos»

Madrid, «Mes Año»

Este Trabajo Fin de Grado se ha depositado en la ETSI Informáticos de la Universidad Politécnica de Madrid para su defensa.

*Trabajo Fin de Grado*

*Grado en «título del grado»*

*Título:* Título del Trabajo, con Mayúscula en Todas las Palabras que no Sean Conectivas (Artículos, Preposiciones, Conjunciones)

«Mes Año»

*Autor:* «nombre y apellidos»

*Tutor:* «nombre y apellidos»

«departamento»

ETSI Informáticos

Universidad Politécnica de Madrid

# Resumen

«Aquí va el resumen del TFG. Extensión máxima 2 páginas.»



# **Abstract**

«Abstract of the Final Degree Project. Maximum length: 2 pages.»



# Tabla de contenidos

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Introducción</b>                              | <b>1</b>  |
| <b>2. Desarrollo</b>                                | <b>3</b>  |
| 2.1. Conocimientos previos y definiciones . . . . . | 3         |
| 2.1.1. Motivación . . . . .                         | 3         |
| 2.1.2. Complejos Simpliciales . . . . .             | 3         |
| 2.1.3. Homología . . . . .                          | 8         |
| 2.1.4. Persistencia . . . . .                       | 9         |
| <b>3. Resultados y conclusiones</b>                 | <b>11</b> |
| <b>Bibliografía</b>                                 | <b>13</b> |
| <b>Anexo</b>  | <b>14</b> |
| .1. Ejemplo de código en python . . . . .           | 15        |
| .2. Ejemplo de fórmula matemática . . . . .         | 15        |





# Capítulo 1

## Introducción

LaSSSS introducción del TFG debe servir para que los profesores que evalúan el Trabajo puedan comprender el contexto en el que se realiza el mismo, y los objetivos que se plantean.

Esta plantilla muestra la estructura básica de la memoria final de TFG, así como algunas instrucciones de formato.

El esquema básico de una memoria final de TFG es el siguiente:

- Resumen en español y inglés (máximo 2 páginas cada uno)
- Tabla de contenidos
- Introducción (con los objetivos del TFG)
- Desarrollo
- Resultados y conclusiones
- Bibliografía (publicaciones utilizadas en el estudio y desarrollo del trabajo)
- Anexos (opcional)

En cualquier caso, es el tutor del TFG quien indicará a su estudiante la estructura de memoria final que mejor se ajuste al trabajo desarrollado.

Con respecto al formato, se seguirán las siguientes pautas, que se muestran en esta plantilla:

- *Tamaño de papel:* DIN A4
- *Portada:* tal y como se recoge en esta plantilla, con indicación de universidad, centro, título de TFG y autor.
- *Segunda página:* información bibliográfica, incluyendo todos los datos del tutor del TFG.
- *Tipo de letra para texto.* Preferiblemente “Bookman Old Style” 11 puntos. Si no fuera posible, las alternativas recomendadas son, por orden de preferencia: “Palatino Linotype”, “Garamond” o “Georgia”.
- *Tipo de letra para código fuente:* “Consolas” o “Roboto mono”

- 
- *Márgenes*: superior e inferior 3 cm, izquierdo y derecho 2.54 cm.
  - *Secciones y subsecciones*: reseñadas con numeración decimal a continuación del número del capítulo. Ej.: subsecciones 2.3.1.
  - *Números de página*: siempre centrado en margen inferior, página 1 comienza en capítulo 1, todas las secciones anteriores al capítulo 1 en número romano en minúscula (i, ii, iii. . .).

Para elaborar la memoria final del TFG con esta plantilla, seguir los siguientes pasos:

1. Descargar e instalar MiKTeX: <https://miktex.org/>
2. Descargar e instalar un editor de  $\text{\LaTeX}$ , por ejemplo Texmaker:  
<https://www.xmlmath.net/texmaker/>
3. Editar el archivo **secciones/ \_DatosTFG.tex**, que hay en la carpeta **secciones** de esta plantilla. Complimentar todos los datos pedidos en dicho archivo. Guardar y cerrar.
4. Compilar el archivo **plantilla\_TFG.tex** (puede ser renombrado). Se generará como resultado un archivo **pdf**.
5. Para escribir la memoria final del TFG se pueden añadir y/o modificar los archivos de la carpeta **secciones** como sea necesario. El resultado se obtiene al compilar el archivo **plantilla\_TFG.tex**.

# Capítulo 2

## Desarrollo

### 2.1. Conocimientos previos y definiciones

En esta sección se mostrarán las principales nociones de Topología Computacional, que nos darán el contexto y conocimientos necesarios para poder comprender el Teorema de Estabilidad y ser capaces de abordar su demostración.

#### 2.1.1. Motivación

La Topología se centra en el estudio de las diversas propiedades de los espacios topológicos y las funciones continuas. Mientras que en el subcampo de la Topología Computacional veremos como podemos hacer uso de diversos algoritmos para poder estudiar las propiedades de los espacios topológicos y ser capaces de resolver problemas topológicos computacionalmente. Para ello lo primero que necesitamos es una manera de representación de nuestros espacios topológicos, manteniendo sus propiedades topológicas.

#### 2.1.2. Complejos Simpliciales

Una de las formas de representar un espacio topológico es a través de la descomposición del mismo en piezas más sencillas. Una descomposición en un complejo si sus piezas son topológicamente simples y sus intersecciones son piezas de dimensión inferior del mismo tipo [5]. Dentro de los complejos se puede observar que hay una gran variedad de tipos, dándonos distintos grados de abstracción. Nosotros vamos a trabajar con los complejos simpliciales, ya que nos darán unas buenas capacidades de computación.

Los complejos simpliciales los podemos estudiar desde un enfoque geométrico y desde un enfoque combinatorio. Partiremos de la definición de complejo simplicial desde el punto de vista geométrico. Para ello recordaremos algunos conceptos de geometría afín.

**Definición 2.1.1.** El conjunto de puntos  $\{u_0, u_1, \dots, u_k\}$  de  $\mathbb{R}^d$  es *afinmente independiente* si los vectores  $\{\overrightarrow{u_0u_1}, \dots, \overrightarrow{u_0u_k}\}$  son linealmente independientes.

**Definición 2.1.2.** Diremos que  $x \in \mathbb{R}^d$  es *combinación convexa* de los puntos  $u_0, u_1, \dots, u_k$  si  $x = \sum_{i=0}^k \lambda_i u_i$  con  $\lambda_i \geq 0 \forall i \in \{0, \dots, k\}$  y  $\sum_{i=0}^k \lambda_i = 1$ .

## 2.1. Conocimientos previos y definiciones

Llamaremos *envolvente convexa* de  $u_0, u_1, \dots, u_k$ , denotado por  $\text{conv}\{u_0, u_1, \dots, u_k\}$ , al conjunto de todas las combinaciones convexas de dichos puntos. Y haciendo uso de este conjunto podremos definir nuestras piezas de la descomposición de la siguiente manera:

**Definición 2.1.3.** Un  $k$ -símplice  $\sigma$  en  $\mathbb{R}^d$  con  $d \geq k$  es la envolvente convexa de  $k + 1$  puntos afínmente independientes  $u_0, u_1, \dots, u_k \in \mathbb{R}^d$ , es decir,  $\sigma := \text{conv}\{u_0, u_1, \dots, u_k\}$

Diremos que el  $k$ -símplice  $\sigma$  tiene dimensión  $k$  y llamaremos *vértices de  $\sigma$*  a los puntos  $u_0, u_1, \dots, u_k$ .

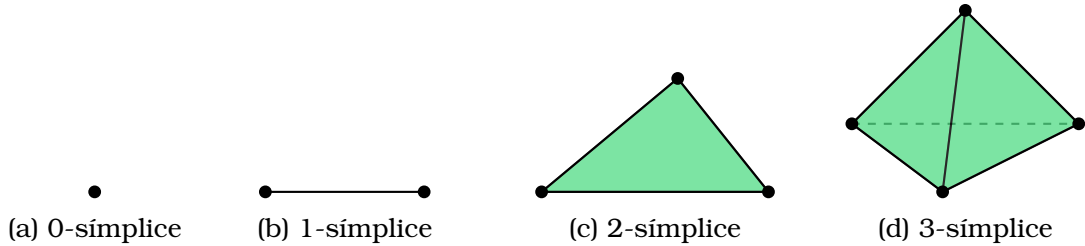


Figura 2.1: Representación de los símplexes de dimensión 0, 1, 2 y 3

Se puede observar que cualquier subconjunto de los vértices de  $\sigma$  será afínmente independiente y por lo tanto definirá un símplex  $\tau$ . De esta forma diremos que  $\tau$  es una *cara de  $\sigma$*  si es una combinación convexa de un subconjunto no vacío de los vértices de  $\sigma$ , y lo denotaremos por  $\tau \leq \sigma$ . Si el subconjunto es propio, diremos que  $\tau$  es *cara propia de  $\sigma$* , y lo denotaremos por  $\tau < \sigma$ . Por otro lado, diremos que  $\sigma$  es *cocara (propia) de  $\tau$*  si  $\sigma \geq \tau$  ( $\sigma > \tau$ ).

Haciendo uso de la definición de caras de un símplex  $\sigma$  podemos definir *el borde y el interior* de  $\sigma$ .

**Definición 2.1.4.** Sea  $\sigma$  un símplex. Entonces

- Se define el *borde de  $\sigma$*  como

$$\text{bd } \sigma = \bigcup_{\tau < \sigma} \tau$$

- Se define el *interior de  $\sigma$*  como

$$\text{int } \sigma = \sigma - \text{bd } \sigma$$

Debido a la definición del símplex como la envolvente convexa de un conjunto de puntos afínmente independientes, un punto  $x \in \sigma$  pertenece al interior de  $\sigma$  si y sólo si todos sus coeficientes  $\lambda_i$  de la combinación convexa son positivos.

Una vez que ya conocemos las piezas de nuestra descomposición vamos a ver como tenemos que unir las y cuales son las principales propiedades de los complejos resultantes.

Como ya hemos visto al principio de la sección, para que una descomposición sea un complejo sus piezas tienen que ser topológicamente simples y sus intersecciones tienen que ser piezas de dimensión inferior del mismo tipo. Es por esto que la manera que tendremos que unir unos símplexes con otros por sus caras.

**Definición 2.1.5.** Un *complejo simplicial* es una colección finita de símplexes  $K$  que satisface las siguientes propiedades:

1. Si  $\sigma \in K$  y  $\tau \leq \sigma$  entonces  $\tau \in K$ .
2. Si  $\sigma_0, \sigma_1 \in K$  y  $\sigma_0 \cap \sigma_1 \neq \emptyset$  entonces  $\sigma_0 \cap \sigma_1 \leq \sigma_i$  para  $i = 1, 2$ .

Se define la dimensión de como el máximo de las dimensiones de sus símlices.

Un ejemplo de complejo simplicial es lo que se muestra en la figura 2.2, mientras que en la figura 2.3 muestra un ejemplo que no es complejo simplicial.

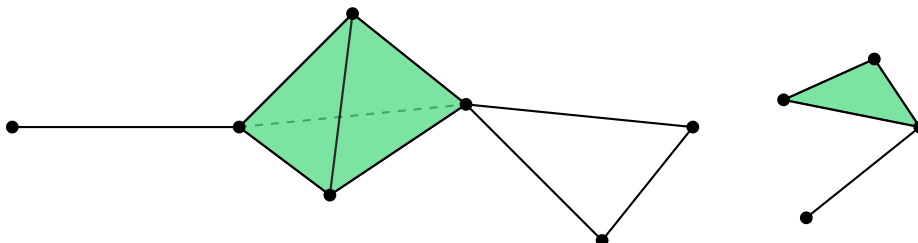


Figura 2.2: Ejemplo de complejo simplicial

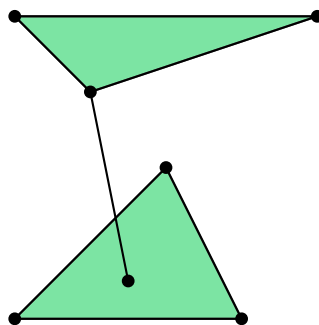


Figura 2.3: Ejemplo de conjunto de símlices que no cumplen las condiciones de complejo simplicial

El *espacio subyacente* de un complejo simplicial  $K$ , denotado  $|K|$ , es la unión de los símlices de  $K$  con la topología heredada del  $\mathbb{R}^d$  donde viven sus símlices. Este espacio subyacente también es llamado *poliedro*. Como se puede observar, el espacio subyacente de un complejo simplicial es compacto, el cual es un resultado que nos será necesario para la demostración del Teorema de Estabilidad.

Dada esta definición del espacio subyacente de un complejo simplicial podemos conocer cuales son los subconjuntos abiertos y cerrados de  $|K|$ .

**Proposición 2.1.1.** Sea  $K$  un complejo simplicial y  $A \subset |K|$  un subconjunto. Entonces  $A$  es un abierto (cerrado) en  $K$  si y sólo si para cada  $\sigma \in K$ ,  $A \cap |\sigma|$  es un abierto (cerrado) de  $|\sigma|$ .

Una vez que conocemos como se definen los complejos simpliciales y su correspondiente topología, vamos a ver como vincular un espacio topológico con un complejo simplicial. Para ello haremos uso de las triangulaciones:

**Definición 2.1.6.** Una *triangulación* de un espacio topológico  $X$  es un par  $(K, h)$  donde  $K$  es un complejo simplicial y  $h : X \rightarrow |K|$  es un homeomorfismo ( $h$  continua, biyectiva y  $h^{-1}$  continua).

Diremos que un espacio topológico es *triangulable* si admite una triangulación. Y por tanto, los espacios  $|K|$  y  $X$  son iguales (topológicamente hablando).

## 2.1. Conocimientos previos y definiciones

También nos será de utilidad poder estudiar los complejos simpliciales contenidos en otro complejo simplicial.

**Definición 2.1.7.** Un *subcomplejo*  $L$  de un complejo simplicial  $K$  es un complejo simplicial  $L \subseteq K$ .

Un subcomplejo de gran interés son los *j-esqueletos*, definidos de la siguiente forma:

$$K^{(j)} = \{\sigma \in K : \dim \sigma \leq j\}$$

Otro subconjunto de simplices que nos será de gran ayuda más adelante es la *estrella de un simple*  $\tau$ , la cual consiste de las cocaras de  $\tau$ , denotado por  $St(\tau)$ . Este conjunto no será siempre un complejo simplicial, así que se define la *estrella cerrada*  $\overline{St}(\tau)$  como el menor subcomplejo de  $K$  que contiene a  $St(\tau)$ . Adicionalmente, se define el *link* de  $\tau$  como:  $Lk(\tau) = \{\tau \in \overline{St}(\tau) : \sigma \cap \tau = \emptyset\}$ .

### Complejos simpliciales abstractos

Una vez que ya conocemos los complejos simpliciales desde el punto de vista geométrico, vamos a abordarlos desde un enfoque combinatorio, el cual nos será de gran ayuda para poder programar los complejos simpliciales.

**Definición 2.1.8.** Un *complejo simplicial abstracto*  $A$  es una colección finita de conjuntos finitos tal que si  $\alpha \in A$  y  $\beta \subset \alpha$  entonces  $\beta \in A$ .

De esta forma se cumple que

- Los conjuntos en  $A$  no vacíos se denominan *simplices abstractos*.
- La *dimensión* de un simple abstracto  $\alpha \in A$  es  $\dim \alpha = \text{card}(\alpha) - 1$ . Y la dimensión del complejo es el máximo de las dimensiones de sus simplices.
- Una *cara* de  $\alpha \in A$  es cualquier subconjunto no vacío de  $\beta \subset \alpha$ .
- El *conjunto de vértices* de  $A$  es la unión de todos sus simplices.
- Un *subcomplejo*  $B$  de un complejo simplicial abstracto  $A$  es un complejo simplicial abstracto  $B \subset A$ .

### Ejemplo

Un ejemplo de complejo simplicial abstracto es el siguiente conjunto

$$A = \{\{0\}, \{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{5\}, \{6\}, \{0, 1\}, \{1, 2\}, \{1, 3\}, \{1, 4\}, \{2, 3\}, \{2, 4\}, \{3, 4\}, \{4, 5\}, \{4, 6\}, \{5, 6\}, \{1, 2, 3\}, \{1, 2, 4\}, \{1, 3, 4\}, \{2, 3, 4\}, \{1, 2, 3, 4\}\}$$

Donde el conjunto de vértices es:  $Vert A = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ .

**Definición 2.1.9.** Sean  $A$  y  $B$  dos complejos simpliciales abstractos. Diremos que  $A$  y  $B$  son *isomorfos* si existe una biyección

$$b : Vert A \longrightarrow Vert B$$

tal que  $\alpha \in A \Leftrightarrow b(\alpha) \in B$ .

De esta forma podremos ver si varios complejos simpliciales abstractos realmente representan el mismo complejo abstracto. Sin embargo, lo que más nos interesaría es ver si un complejo simplicial abstracto puede representar correctamente un complejo simplicial (definido geoméricamente) y viceversa.

Siempre podremos generar complejos simpliciales abstractos a partir de un complejo simplicial (geométrico) de la siguiente forma:

**Definición 2.1.10.** Sea  $K$  un complejo simplicial y  $V$  el conjunto de vértices de  $K$ . Llamaremos *esquema de vértices* al complejo simplicial abstracto  $A$  formado por todos aquellos subconjuntos de  $V$  que generan símlices en  $K$ .

Y bajo ciertas circunstancias podremos hacer el paso opuesto de construir un complejo simplicial (geométrico) a partir de otro abstracto:

**Definición 2.1.11.** Sean  $A$  un complejo simplicial abstracto y  $K$  un complejo simplicial. Diremos que  $K$  es una *realización geométrica* de  $A$ , si  $A$  es isomorfo al esquema de vértices de  $K$ .

**Teorema 2.1.1.** Todo complejo simplicial abstracto de dimensión  $d$  admite una realización geométrica en  $\mathbb{R}^{2d+1}$ .

Así pues, garantizamos los complejos simpliciales abstractos como una representación fiel de un complejo simplicial (geométrico).

## Aplicaciones simpliciales

### Subdivisiones

Veremos que hay ocasiones que nos interesará poder ir haciendo los símlices de nuestro complejo simplicial más pequeños, pero conservando el espacio topológico. Por esta razón, definimos *subdivisión de un complejo simplicial* de la siguiente manera:

**Definición 2.1.12.** Sea  $K$  un complejo simplicial. Diremos que un complejo simplicial  $L$  es una *subdivisión* de  $K$  si:

- $|K| = |L|$ .
- Cada símlice de  $L$  está contenido en un símlice de  $K$ .

Hay muchas maneras de obtener subdivisiones de un complejo simplicial, pero nosotros nos centraremos en la *subdivisión baricéntrica*, denotado por  $L = \text{Sd}K$ . Para la construcción de esta subdivisión, tenemos que definir el *baricentro* de un símlice y el *cono* de un símlice de vértice  $v$ .

**Definición 2.1.13.** Sea  $\sigma$  un  $k$ -símlice, tal que  $\sigma = \text{conv}\{v_0, v_1, \dots, v_k\}$ . Llamaremos *baricentro* de  $\sigma$  al punto

$$b_\sigma = \sum_{i=0}^k \frac{v_i}{k+1} \in \text{int } \sigma$$

**Definición 2.1.14.** Sea  $\sigma$  un  $k$ -símlice, tal que  $\sigma = \text{conv}\{v_0, v_1, \dots, v_k\}$  y  $v$  un punto no contenido en el subespacio afín generado por  $\{v_0, v_1, \dots, v_k\}$ . Se define el *cono* de  $\sigma$  con vértice  $v$  y se denota por  $\sigma * v$  como el  $k+1$ -símlice generado por  $\{v, v_0, v_1, \dots, v_k\}$ .

Sea  $K$  un complejo simplicial. Se define la *subdivisión baricéntrica* de  $K$  como el complejo simplicial  $\text{Sd}K$  que se construye inductivamente sobre el  $j$ -esqueleto como sigue:

1.  $\text{Sd}K^{(0)} = K^{(0)}$ .
2.  $\text{Sd}K^{(j)}$  es la unión de  $\text{Sd}K^{(j-1)}$  con el conjunto de todos los símlices de la forma  $b_\sigma * \tau$ , donde  $\sigma$  es un  $j$ -símlice y  $\tau$  es cualquier símlice de  $\text{Sd}K^{(j-1)}$  contenido en una cara de  $\sigma$ .

En la figura 2.4 se muestra la primera y segunda subdivisión baricéntrica de un complejo simplicial.

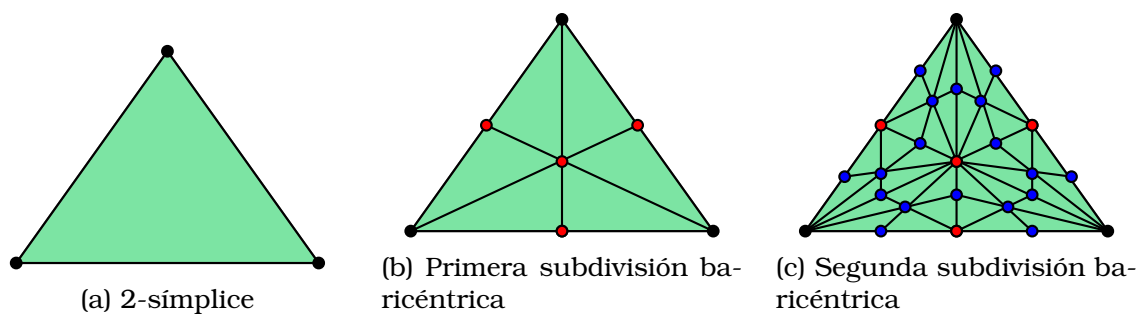


Figura 2.4: Primera y segunda subdivisión baricéntrica de un 2-símlice

### Aproximaciones simpliciales

Desde el punto de vista computacional nos encontramos con el problema de que tenemos una representación de un espacio topológico a través de una discretización finita de los puntos de dicho espacio, y nuestro objetivo es poder recuperar las propiedades del espacio topológico original a partir de esta nube de puntos. Para ello usaremos complejos simpliciales asociados a dicha nube de puntos.

**def complejo de Čech**

**def complejo de Vietoris-Rips**

**def diagrama de Voronoi + triangulación Delonay**

**def alpha complejo**

### 2.1.3. Homología

Como se puede ver en [añadir cita] la homotopía es una gran herramienta algebraica para poder obtener propiedades de los espacios topológicos. Sin embargo, los métodos para el cálculo de la homotopía no son los mejores computacionalmente. Así pues, se propone la homología como formalismo algebraico, que aunque no es capaz de obtener tanta información topológica sobre el espacio como con otros formalismos, contiene algoritmos mucho más rápidos y eficientes.



### grupos de cadenas

### operador borde: complejos de cadenas, ciclos y bordes

### grupos de homología simplicial: definición, números de betti, característica de euler, teorema de conexión y números de betti

### aplicaciones inducidas para grupos de homología

### Homología singular

Comentar existencia de la homología singular y el porqué se creó y que beneficios, pero debido a que el teorema de estabilidad parte de un espacio topológico triangulable no es necesario

*HERBERT EDELSBRUNNER AND JOHN HARER: PERSISTENT HOMOLOGY — A SURVEY*

“REMARK 2.1. There are a variety of other homology theories defined in topology. Most notably singular homology has the advantage that it exists for arbitrary topological spaces and it is easy to define concepts like induced maps, prove that homotopy equivalent maps induce isomorphisms on homology, etc. However, in singular homology the chain groups are infinite-dimensional and therefore not directly suited to computational methods. Nevertheless, the reader should be aware of this theory. It justifies the common practice of talking about homology for spaces without an explicit triangulation. Most of the time, and certainly in low dimensions, singular and simplicial homology are equivalent theories.”

*Crossley, Martin D., Essential Topology. Springer-Verlag, London, 2005.*

“For simplicial homology we supposed that our space had already been expressed as a simplicial complex, i.e., decomposed into a union of simplices. Some spaces cannot be expressed in such a way, and even those that can, can usually be expressed as a simplicial complex in many different ways. Choosing one way can obscure some details of the space. For these reasons “singular” homology was developed, which gets around this problem by, in a very loose sense, considering all possible simplicial decompositions.”

### 2.1.4. Persistencia

#### funciones reales

poder ver gráficamente como a través de las contraímagenes se generan diferentes componentes al pasar por puntos críticos

#### funciones morse

def variedad diferenciable, definición de las funciones morse, ver como la homología cambia al pasar por los puntos críticos y ver las nociones de nacimiento y muerte

#### funciones tame

definición función tame, subniveles, grupos de persistencia a partir de funciones tame, critical value lema, números de betti de grupos de persistencia y su relación con las multiplicidades.

## 2.1. Conocimientos previos y definiciones

---

Definición de diagrama de persistencia, k-triangle lemma

### **persistencia en complejos simpliciales**

particularizar lo visto en funciones tame pero con complejos simpliciales

### **funciones PL**

definición de las funciones pl, generación de filtraciones a partir del lower star filtration y estudio de los puntos críticos de las funciones pl para comprobar que son funciones tame.

## **Capítulo 3**

# **Resultados y conclusiones**

Resumen de resultados obtenidos en el TFG. Y conclusiones personales del estudiante sobre el trabajo realizado.



# Bibliografía

- [1] Publicaciones utilizadas en el estudio y desarrollo del trabajo. Hay que utilizar un sistema internacional para referencias bibliográficas, de acuerdo con las indicaciones del tutor. Por ejemplo, el **sistema de IEEE**.
- [2] M. de Guzmán y B. Rubio, *Integración: Teoría y Técnicas*, Alhambra, Madrid, 1979.
- [3] P. Mattila, *Geometry of Sets and Measures in Euclidean Spaces*, Cambridge University Press, Cambridge, 1995.
- [4] C.A. Rogers, *Hausdorff Measures*, Cambridge University Press, Cambridge, 1998.
- [5] H. Edelsbrunner y J. Harer, *Computational Topology: An Introduction*, 2010.



# Anexo

Este capítulo es opcional, y se escribirá de acuerdo con las indicaciones del Tutor.

## .1. Ejemplo de código en python

```
1 # -*- coding: utf-8 -*-  
2 import sympy as sy  
3 from sympy.abc import x
```

## .2. Ejemplo de fórmula matemática

$$e^{i\pi} + 1 = 0$$