

# A Large Scale Structure Void Identifier for Galaxy Surveys Based on the $\beta$ -Skeleton Graph Method

FELIPE LEONARDO GÓMEZ-CORTÉS<sup>1</sup>  
MASTER STUDENT  
CODE 201324084

—  
JAIME E. FORERO-ROMERO<sup>1</sup>  
ADVISOR

<sup>1</sup>*Physics Department, Universidad de Los Andes*

## ABSTRACT

We are living the golden age of observational cosmology. There is a consolidated standard cosmological model ( $\Lambda$ CDM) that explains the observed Large Scale Structure (LSS) of galaxies by introducing dark matter and dark energy as the dominant Universe components along with baryonic matter. Furthermore, we are able to do precise observational measurements of the cosmological parameters in that model. Most of this success is due to computational cosmology that is now an established tool to probe theoretical models and compare them with observations. The main features of the LSS can be reproduced in large cosmological N-body simulations.

One of the most striking features in the LSS are voids; irregular volumes on the order of tens of Mpc scales, where the matter density is below the Universe average density. Statistics about voids such as its volume, shape and orientation also encode cosmological information. For this reason there is a great interest in algorithms that find and characterize voids both in simulations and observations.

The objective of this work is to develop a new void finder based on the  $\beta$ -Skeleton method. The  $\beta$ -Skeleton has been widely used on image processing, recognition and machine learning applications, it has been introduced recently in LSS analysis. It is a fast tool identifying LSS filamentary structure, and promises to be a robust tool to make cosmological tests. After developing the void finder we will characterize the  $\beta$ -skeleton voids in simulations and observations. We will also make prediction for the upcoming Dark Energy Spectroscopic Instrument about the void population that could be detected with that experiment.

Keywords: Large Scale Structure, cosmology, voids, computational astrophysics

## RESUMEN

Estamos viviendo en la era dorada de la cosmología observacional. Existe un modelo estándar cosmológico ( $\Lambda$ -CDM) consolidado que explica las observaciones de la Estructura de Gran Escala (LSS) de galaxias mediante la introducción de materia oscura y energía oscura como las componentes dominantes del Universo junto con la materia bariónica. Más aún, somos capaces de realizar mediciones precisas de los parámetros cosmológicos de este modelo a partir de observaciones. Gran parte de

estos alcances es debido a la cosmología computacional que es ahora una herramienta fuertemente establecida para probar modelos teóricos y compararlos con las observaciones. Las características principales de la LSS pueden ser reproducidas en grandes simulaciones cosmológicas de N-cuerpos.

Una de las características más prominentes en la LSS son los vacíos: volúmenes irregulares de escalas del orden de decenas de Mpc, donde la densidad de materia está por debajo de la densidad media en el Universo. El análisis estadístico de propiedades de los vacíos, como su volumen, forma y orientación también nos puede dar información cosmológica. Por esta razón existe un gran interés en algoritmos que encuentren y caractericen vacíos tanto en simulaciones como en observaciones.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un nuevo buscador de vacíos basado en el método  $\beta$ -Skeleton. El método  $\beta$ -Skeleton ha sido ampliamente utilizado en reconocimiento, procesamiento de imágenes y aplicaciones de *machine learning*, recientemente ha sido introducido en el análisis de LSS. Esta es una herramienta rápida para identificar estructuras filamentarias en la LSS, y promete ser una herramienta robusta para realizar análisis cosmológicos. Luego de desarrollar el buscador de vacíos caracterizaremos los vacíos del  $\beta$ -Skeleton en simulaciones y observaciones. También realizaremos predicciones para el experimento en desarrollo Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) acerca de la población que podrá detectar.

Palabras clave: estructura de gran escala, cosmología, vacíos, astrofísica computacional.

## 1. INTRODUCCIÓN

Hola Mundo

## 2. MARCO TEÓRICO

Actualmente se dispone tanto de catálogos de halos de materia oscura de simulaciones como de catálogos de galaxias de observaciones.

Se dispone de la librería “NGL” (Correa & Lindstrom 2012) (Neighborhood Graph Library) para calcular la estructura  $\beta$ -Skeleton. Esta librería es de uso libre, está escrita en C++. Inicialmente fue desarrollada para estudiar topología de conjuntos de datos con un número de muestra pequeño. Puede encontrar vecinos en los conjuntos de puntos usando distintos métodos como los Grafos de Gabriel y el  $\beta$ -Skeleton, estos métodos resultan computacionalmente más económicos y rápidos que otros métodos más robustos como la triangulación de Delaunay.

El método  $\beta$ -Skeleton ha sido introducido en astrofísica recientemente (Fang et al. 2018) para encontrar el grafo de la LSS en catálogos de halos de materia oscura de distintas simulaciones. Ha probado ser una herramienta útil para detectar estructuras subyacentes diferentes en simulaciones cosmológicas generadas por métodos distintos.

## 3. OBJETIVOS

### 3.1. *Objetivo Principal*

Desarrollar un nuevo buscador de vacíos de la red cósmica (LSS) en catálogos de galaxias basado en el método  $\beta$ -Skeleton.

### 3.2. *Objetivos Específicos*

- Identificar y catalogar vacíos de la red cósmica en catálogos de halos de materia oscura de simulaciones y en catálogos de galaxias desde observaciones.

- Calcular el parámetro cosmológico asociado a la energía oscura a partir del catálogo de vacíos de la red cósmica
- Estimar los posibles resultados observacionales que pueda medir el experimento DESI.

#### 4. METODOLOGÍA

La primera parte de este trabajo consiste en desarrollar el código del buscador de vacíos en la red cósmica. Aquí se incluye una etapa de calibración de parámetros libres del buscador. En la segunda parte se utilizará el código para obtener catálogos de vacíos de la red a partir de catálogos de halos de materia oscura de simulaciones o catálogos de galaxias de observaciones, mediante análisis estadístico de los catálogos de vacíos se compararán simulaciones y observaciones. En la tercera parte se hará un análisis estadístico para determinar parámetros cosmológicos. Finalmente se podrá dar un estimado de las observaciones que podrá llegar a medir el experimento DESI.

##### 4.1. Desarrollo del código

El código será escrito en Python3 o C++, podrá ejecutarse en el Colaboratorio o en el HPC de la facultad de ciencias de la Universidad de los Andes.

Para desarrollar el código se parte de la lectura de archivos estándar de catálogos de halos de materia oscura o distribución de galaxias. Estos puntos se ubican en un espacio tridimensional.

Por definición los vacíos cósmicos son regiones con baja densidad de materia, así que se estudiarán regiones de un campo escalar. Para esto es conveniente dividir el espacio en celdas discretas. El tamaño de las celdas será el primer parámetro a calibrar en el código.

Se aplica el método  $\beta$ -Skeleton para conectar los puntos en el espacio y trazar los filamentos de la red cósmica. En esta punto se utilizará la librería NGL (Correa & Lindstrom 2012). El parámetro  $\beta$  de este método es otro parámetro a calibrar en el código. Se puede utilizar como guía el resultado obtenido por Fang et al. (2018). Se transforman estos puntos y filamentos en un campo de densidad de materia. Este primer campo escalar de materia es bastante discreto y discontinuo. Será suavizado mediante un kernel Gaussiano, el número de veces que sea suavizado el campo de densidad y el tamaño de las celdas del kernel serán parámetros a calibrar en el código.

Una vez suavizado el campo de densidad de materia se utiliza identificarán los centroides de los vacíos de la red. Esto se puede realizar revisando, por ejemplo, puntos intermedios en conexiones largas que pueden aparecer en un  $\beta$ -skeleton con parámetro  $\beta$  bajo, pero no aparecen en la red obtenida con el valor de  $\beta$  apropiado.

Ya identificados los centroides de los vacíos, se utiliza el método *watershed* para identificar las regiones de baja densidad (Sutter et al. 2015). Con este método se planta una semilla en los centroides, todas las semillas crecen a la misma velocidad; una celda vecina a la vez. Se establecen ciertas reglas, por ejemplo las regiones no crecerán en las regiones donde el campo escalar de densidad tenga un valor alto, o se detendrán cuando se encuentren con otra región en crecimiento. Otro método a probar para identificar regiones es la construcción de esferas dentro de los vacíos de la red

Se calculan propiedades de las regiones como tamaño, forma, orientación. (Tensor de momento de inercia)

#### 5. CRONOGRAMA

#### 6. RESULTADOS ESPERADOS

## REFERENCES

- van de Weygaert, Rien 2014, Proceedings of the IAU, 308, 493
- Fang, F.; Forero-Romero, J.; Rossi, G.; Li, X. & Feng, L 2018, arXiv, 1809.00438 astro-ph
- Alcock, C. & Paczyński, B. 1979, Nature, 281, 358
- Leclercq, F.; Jasche, J. et al. 2015, JCAP, 03, 047
- Correa, Carlos & Lindstrom, Peter. 2011, IEEE TVCG 17,12 (Dec 2011), 1852-1861
- Sutter, P. M. & Lavaux G. & Hamaus, N & et al. 2015, A&C, 9, 1-9
- El-Ad, H. & Piran, T. 1997, ApJ, 491, 2, 421