
Título del proyecto:
**Cosmología Computacional y Observacional
(CoCO)**

Investigador Principal
Jaime Ernesto Forero Romero
Grupo de Investigación en Astrofísica, Código COL0015473
Departamento de Física, Facultad de Ciencias,
Universidad de los Andes, Bogotá-Colombia

Índice

1. Conformación del equipo de investigación	3
2. Antecedentes y resultados previos del equipo de investigación	3
3. Temática de investigación	5
4. Resumen ejecutivo	5
5. Palabras clave	6
6. Planteamiento del problema	6
7. Justificación	7
8. Marco conceptual	7
8.1. Teoría	8
8.2. Simulaciones	8
8.3. Observaciones	9
9. Estado del arte	10
9.1. Pruebas de parámetros cosmológicos	10
9.2. Campañas observacionales	11
9.3. Simulaciones para el diseño de DESI	11
10. Objetivos	12
10.1. Objetivos generales	12
10.2. Objetivos específicos	12
11. Metodología	13
12. Resultados esperados de la investigación	16
13. Resultados esperados - Productos	17
14. Trayectoria del equipo de investigación	17
15. Posibles evaluadores	18
16. Cronograma	18
17. Impacto ambiental	21
18. Presupuesto	26

1. Conformación del equipo de investigación

La investigación se hará dentro del grupo de astrofísica de la Universidad de los Andes, código GrupLAC COL0015473. Los integrantes del equipo son los siguientes.

- Un profesor de planta del grupo de Astrofísica de la Universidad de los Andes: Jaime Ernesto Forero Romero, PhD. Dedicación: 7 horas/semana.
- Dos estudiantes de doctorado en el departamento de Física de la Universidad de los Andes.
 - Felipe Leonardo Gómez Cortés (Físico) con participación activa en los 36 meses del proyecto. Dedicación: 20 horas / semana.
 - Estudiante por definir con participación activa en los 24 últimos meses del proyecto (los primeros 12 estarán enfocados a actividades formativas). Dedicación: 20 horas / semana.

Con el apoyo de los siguientes asesores internacionales:

- Stefan Gottloeber, PhD. Científico en el Leibniz Institute for Astrophysics, Alemania.
- Changbom Park, PhD. Miembro permanente del Korean Institute for Advanced Studies, Corea del Sur.
- Robert Cahn, PhD. Científico en el Lawrence Berkeley National Laboratory, Estados Unidos.

Adicionalmente el proyecto cuenta con el soporte del siguiente personal técnico de la Universidad de los Andes:

- Ingeniero de cómputo del departamento de Física. Por determinar, actualmente hay un proceso de contratación para este cargo.
- Ingeniero de cómputo de alto rendimiento en el Dirección de Servicios de Información y Tecnología. Por determinar, actualmente hay un proceso de contratación para este cargo.

2. Antecedentes y resultados previos del equipo de investigación

El líder del equipo de investigación tiene un PhD en el área de simulaciones de formación de galaxias en un contexto cosmológico, 5 años de experiencia postdoctoral en el tema (en Alemania y Estados Unidos) y 2 años de trabajo como investigador/profesor en el grupo de Astrofísica de la Universidad de los Andes.

Adicionalmente durante el último año, se ha involucrado en dos colaboraciones internacionales:

- Con el experimento DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument) liderado por el Lawrence Berkeley National Laboratory en Estados Unidos (<http://desi.lbl.gov/>). Esta colaboración medirá el efecto de la energía oscura en la historia de expansión del Universo. Medirá los espectros de cerca de 20 millones de galaxias para crear un mapa 3D del Universo cercano

de una profundidad de 10mil millones de años luz. El contacto principal en esta colaboración desde comienzos del 2014 es el Dr. Robert Cahn, con quien se han venido desarrollando trabajos para la preparación del experimento que empezará a tomar datos en el 2018.

- Con el equipo de Cosmología del Korean Institute for Advanced Studies (KIAS) (<http://www.kias.re.kr/>). Esta colaboración se centra en el desarrollo de nuevos algoritmos para acotar los parámetros cosmológicos a través de mediciones de la distribución de galaxias a gran escala. El contacto principal en esta colaboración desde mediados del 2013 es el Dr. Changbom Park. Un aspecto atractivo de esta colaboración es poder probar estos algoritmos sobre los datos observacionales del SDSS-III (Sloan Digital Sky Survey) (<https://sdss3.org/>) en el periodo en el que todavía no son públicos los datos, gracias al que KIAS hace parte de la colaboración SDSS.

En los últimos 5 años, el líder del grupo se ha dedicado a investigar y publicar en el tema. En los temas relevantes para esta propuesta sobresalen las siguientes publicaciones:

En el tema de simulaciones y evolución de estructura a gran escala:

- *The velocity shear tensor: tracer of halo alignment*, Libeskind N., Hoffman Y., **Forero-Romero** J.E., Gottloeber S., Knebe A., Steinmetz M., Klypin A., MNRAS 428, 2489, 2013
- *The dark matter assembly of the Local Group in constrained cosmological simulations of a Λ CDM universe* **Forero-Romero** J.E., Hoffman Y., Yepes G., Gottlöber S., Piontek R., Klypin A., Steinmetz M., MNRAS, 417, 1434, 2011
- *Halo based reconstruction of the cosmic mass density field* Muñoz-Cuartas J. C., Müller V, **Forero-Romero** J. E., MNRAS, 417, 1303, 2011
- *A Dynamical Classification of the Cosmic Web*. **Forero-Romero** J.E., Hoffman Y., Gottloeber S., Klypin A., Yepes G., MNRAS, 396, 1815-1824, 2009
- *The coarse geometry of merger trees in Λ CDM*. **Forero-Romero** J.E., MNRAS, 399, 762-768, 2009

En el área de utilizar eventos extremos como prueba cosmológica:

- *The abundance of Bullet Groups in Λ CDM*, J. G. Fernández-Trincado, **J. E. Forero-Romero**, G. Foex, V. Motta, T. Verdugo, V. Motta, ApJ Letter, 787, L32, 2014.
- *Bullet Clusters in the MareNostrum Universe*. **Forero-Romero** J.E., Yepes G., Gottlöber S., ApJ, 725, 1, 2010.

En el área de analizar datos de simulaciones cosmológicas para hacerlas disponibles a la comunidad académica:

- *The MultiDark Database: Release of the Bolshoi and MultiDark Cosmological Simulations*, K. Riebe, A. M. Partl, H. Enke, **J.E. Forero-Romero**, S. Gottloeber, A. Klypin, G. Lemson, F. Prada, J. R. Primack, M. Steinmetz, V. Turchaninov, Astronomische Nachrichten, 334, 691, 2013.

3. Temática de investigación

El proyecto se enmarca en la temática de **investigación fundamental**.

4. Resumen ejecutivo

La cosmología observacional entró en una época dorada con la medición de las anisotropías de la radiación cósmica de fondo (Premio Nobel de Física 2006) y la medición de la expansión acelerada del Universo (Premio Nobel de Física 2011).

Hoy en día una de las fronteras de la investigación en **Cosmología Observacional** es la obtención de mejores mediciones de la historia de expansión acelerada del Universo y así inferir cotas sobre uno de los posibles responsables de este efecto: la Energía Oscura. Una de las técnicas observacionales que se utiliza con ese propósito es la detección del pico de Oscilaciones Acústicas de Bariones (OAB) que requiere la medición de las *posiciones* de millones de galaxias [8]. Otras métodos usan información sobre las *velocidades* peculiares (i.e. velocidades que no esán asociadas al flujo de Hubble) de las galaxias y las distorsiones que estas generan en las observaciones para cuantificar el crecimiento de estructura a gran escala [19].

En todos estos esfuerzos observacionales para medir el Universo las **simulaciones computacionales** juegan un rol fundamental, especialmente en los métodos que usan las velocidades peculiares. Las simulaciones son utilizadas para traducir las premisas teóricas en cantidades observables. Es decir, son un puente entre la teoría y la observación.

Las simulaciones de formación de estructura a gran escala en el Universo han llegado a un gran punto de madurez durante los últimos treinta años de investigación en el tema dando nacimiento a un área de investigación conocida como **Cosmología Computacional**. Hoy en día se utilizan las mismas simulaciones al momento de planear una nueva campaña observacional; el fin principal es asegurarse de que los efectos físicos que se esperan medir están al alcance del instrumento y de los métodos estadísticos para analizar los datos.

La presente propuesta tiene como objetivo hacer uso de los fondos para hacer investigación en Cosmología Computacional y Cosmología Observacional.

En el frente de cosmología computacional proponemos realizar una serie de simulaciones de la distribución de materia en el Universo a gran escala sin precedentes en el país. Para la preparación de estas simulaciones haremos uso de las máquinas de las Instalaciones para Cómputo de Alto Rendimiento de la Universidad de los Andes, las cuales serán instaladas y puestas en funcionamiento durante el segundo semestre del 2014.

Vamos a usar estas simulaciones de manera principal para fundamentar nuestro trabajo en Cosmología Observacional en dos colaboraciones internacionales.

La primera colaboración, con el Lawrence Berkeley National Laboratory, se trata de contribuir en la preparación del experimento DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument). DESI es una colaboración internacional de más de 100 científicos que construirá el experimento de siguiente generación para medir la historia de expansión del Universo haciendo un mapa de la distribución de 25 millones de galaxias, 10 veces más de lo que ha sido observado hasta la fecha [?]. En particular, esperamos durante la duración del presente proyecto con COLCIENCIAS aportar al diseño

y optimización de la estrategia de las observaciones.

La segunda colaboración, con el Korean Institute for Advanced Studies (KIAS), trata de la restricción de parámetros cosmológicos a partir de la anisotropía de la distribución de galaxias. En una primera etapa esperamos usar las simulaciones para optimizar los métodos estadísticos de medición del efecto buscado. En una segunda etapa vamos a aplicar este conocimiento sobre los datos observacionales del proyecto SDSS-III (Sloan Digital Sky Survey), algo posible gracias a la participación de KIAS en ese proyecto.

Los proyectos posibles con la serie de simulaciones que vamos a realizar abren la puerta a otro tipo de estudios sobre la estructura del Universo a gran escala [11, 12] y la cuantificación de la abundancia eventos de colisiones extremas en el Universo [10, 9]. Adicionalmente, estos datos se harán disponibles a toda la comunidad (colombiana e internacional) para realizar diferentes tipos de estudios y análisis [17]. En el curso de este proyecto también vamos a organizar una escuela internacional de un mes, con expertos internacional, para formar recurso humano en Colombia y en la región que esté en capacidad de utilizar recursos computacionales avanzados para resolver problemas en cosmología computacional y observacional.

5. Palabras clave

Astrofísica — Cosmología — Materia oscura — Energía oscura — Estructura a gran escala — Computación de alto rendimiento

6. Planteamiento del problema

Esta propuesta busca realizar una serie de simulaciones computacionales del Universo a gran escala. Esto lo haremos con el objetivo de cuantificar la influencia de diferentes parámetros cosmológicos sobre la formación de grandes estructuras. Esto nos permitirá contribuir a colaboraciones internacionales sobre cosmología observacional.

De partida nos ubicamos dentro de lo que se conoce como el modelo estándar de la cosmología. En este modelo el contenido de materia en el Universo está dominado por la materia oscura. Adicionalmente, hay un componente, conocida como la constante cosmológica (la densidad de energía asociada al espacio vacío), que explica la expansión acelerada del Universo. En este modelo la materia bariónica es la minoría en el contenido de materia energía del Universo. La repartición de estas tres componentes en términos de fracciones de la densidad total corresponden aproximadamente a un 5 % para los bariones, un 25 % para la materia oscura y un 70 % para la constante cosmológica. Adicionalmente, en este modelo consideramos que la teoría que describe la interacción gravitacional es la Relatividad General de Einstein.

En este contexto, la herramienta principal para responder nuestra pregunta original son las simulaciones numéricas. Los métodos computacionales permiten simular grandes volúmenes del Universo para seguir la evolución temporal de la distribución de materia. Este ejercicio se puede hacer para diferentes valores de los parámetros cosmológicos y medir las consecuencias de los cambios en diferentes universos ficticios.

El avance en los métodos computacionales ha estado en gran parte motivado por los avances en técnicas observacionales que permiten hacer mapas del Universo a grandes escalas. Estos mapas se construyen a partir de mediciones de los espectros de millones de galaxias. Normalmente, estas campañas observacionales son llevadas a cabo por grandes colaboraciones internacionales y cuentan con científicos capaces de realizar los estudios de Universos simulados.

La presente propuesta busca entonces reponder a la pregunta sobre la estructura del Universo a gran escala a partir de simulaciones computacionales, teniendo en mente la aplicación del conocimiento adquirido a datos observacionales y la planeación de futuras observaciones.

7. Justificación

Entre las razones que justifican la pertinencia de esta propuesta se encuentran las siguientes:

- Contribuir a dar respuestas a preguntas actuales sobre la formación de estructuras en escalas cosmológicas en un Universo dominado por materia oscura.
- Desarrollar métodos para analizar datos observacionales de observaciones de distribución de galaxias a gran escala para inferir valores de parámetros cosmológicos.
- Integrar colaboraciones internacionales a la frontera de la investigación en cosmología computacional y observacional.
- Generación de impacto tecnológico inmediato en el área de computación de alto rendimiento al:
 - Realizar las simulaciones propuestas.
 - Analizar los datos de estas simulaciones.
 - Desarrollar herramientas para garantizar y analizar la gran cantidad de datos de las simulaciones.
 - Desarrollar e implementar nuevos algoritmos para la planeación de grandes campañas observacionales del Universo.
- Formación de recursos humanos en la práctica de la computación de alto rendimiento y en el procesamiento de datos para hacerlos accesibles para la comunidad académica interesada.

8. Marco conceptual

El principal elemento conceptual de este proyecto es la **Cosmología vista a partir de la estructura del Universo a gran escala**. Este elemento central se divide en tres temas: teoría, simulaciones y observaciones.

8.1. Teoría

Desde el punto de vista teórico hay dos observables principales que dependen de los parámetros cosmológicos: la historia de expansión del Universo y el crecimiento de la estructura a gran escala. Ambos pueden ser medidos a partir de la distribución de galaxias en el Universo.

La **historia de expansión** del Universo, medida por la constante de Hubble dependiente del redshift $H(z)$, depende directamente del contenido de materia y energía del Universo. Este contenido se puede separar en las siguientes componentes: la densidad de materia bariónica (Ω_b), la densidad de materia oscura (Ω_{dm}) y la densidad de energía oscura (Ω_{DE}), la cual puede variar en el tiempo dependiendo del valor de la constante w en la ecuación de estado, Ω_{DE} donde

$$\Omega_{DE}(z) = \Omega_{DE,0}(1+z)^{3(1+w)}. \quad (1)$$

Para esto hemos usado el resultado de un Universo plano con $\Omega_b + \Omega_{dm} + \Omega_{DE} = 1$ y w constante en el tiempo. También hemos tomado Ω_{DE} de manera general para una Energía Oscura sin asumir que se trata de una constante cosmológica, Ω_Λ con $w = -1$.

Hoy en día estos parámetros cosmológicos están acotados observacionalmente cerca a los siguientes valores $\Omega_b = 0,05$, $\Omega_{dm} = 0,25$, $\Omega_{DE} = 0,70$ y $w = -1$. De estos parámetros los que más interés generan actualmente son Ω_{DE} y w porque están relacionados con la expansión acelerada del Universo, algo que puede corresponder a una simple constante cosmológica o puede ser la evidencia de que Relatividad General no es la teoría correcta para la gravedad [15].

Por otro lado, el **crecimiento de estructura a gran escala** depende principalmente de la fluctuaciones iniciales en el campo de densidad de materia en las épocas tempranas del Universo y de la teoría de la gravedad que hace que esas fluctuaciones se amplifiquen generando la variedad de estructura que observamos en el Universo. En este contexto la cantidad central es el contraste de densidad $\delta(\mathbf{x}, t) \equiv \rho(\mathbf{r}, t)/\bar{\rho}(r) - 1$ de la materia oscura. En el régimen lineal de crecimiento está dado por la siguiente ecuación diferencial

$$\ddot{D} + 2H(z)\dot{D} - \frac{3}{2}\Omega_m H_0^2(1+z)^3 D = 0, \quad (2)$$

donde H_0 es la constante de Hubble en el presente y $D(t)$ es la función de crecimiento. Incluso en el régimen no lineal el contraste de densidad también depende de esta función $D(t)$.

Lo interesante en este caso es que diferentes modelos de la gravedad (entre ellos la Relatividad General) hacen predicciones sobre el comportamiento de esta función $D(t)$. De esta manera una estrategia posible para probar teorías de gravedad modificada es medir al mismo tiempo la historia de expansión y la historia de crecimiento de estructuras para ver si dan valores consistentes de $H(z)$ y de w [15].

8.2. Simulaciones

Aunque la descripción analítica esbozada anteriormente permite acercarse a varios fenómenos del crecimiento de estructura, una descripción detallada solamente ha sido posible a través de las simulaciones computacionales. Las simulaciones buscan seguir la evolución del campo de densidad de materia oscura en función del tiempo.

En el caso de simulaciones en la cosmología estándar Λ Cold Dark Matter (Λ CDM) se sigue un aproximación en la cual solamente se simula la componente oscura y no la bariónica, dado que la primera domina la dinámica del sistema. Luego de esto se toma un volumen computacional que represente una región del universo con distribución de materia oscura se discretizada en partículas computacionales con posiciones y velocidades que pueden evolucionar en el tiempo. Esta forma general de realizar los cálculos ha sido perfeccionada durante los últimos treinta años de investigación en el tema de formación de estructura en un Universo domiado por la materia oscura [6, 13, 21]. Aunque es posible incluir una descripción del gas bariónico y de los procesos asociados a las formación estelar, nosotros centraremos nuestra discusión en torno a las simulaciones que solamente incluyen la materia oscura, dado que son suficientes para los objetivos de nuestro proyecto.

Como en todo experimento numérico hay dos cantidades centrales para la descripción del sistema: las condiciones iniciales y las reglas para la evolución temporal del sistema. Las condiciones iniciales están definidas las posiciones y velocidades iniciales de las partículas computacionales. En este caso los desplazamientos de las partículas con respecto a una distribución homogénea de partículas están relacionados con las fluctuaciones tempranas en el campo de densidad y se pueden describir estadísticamente a través del espectro de potencias. Una vez las posiciones iniciales están determinadas se determinan las velocidades iniciales, usualmente a través de la aproximación de Zeldovich aunque es posible imponer estas condiciones iniciales a través de otras aproximaciones perturbativas [22].

La simulación sigue entonces la evolución de las posiciones y velocidades de las partículas durante la historia del Universo. En el rango de evolución no lineal se forman sobre-densidades de materia oscura que reciben el nombre de halos, en los centros de estos halos las galaxias deberían formarse y evolucionar. En este punto es posible entonces pasar a una descripción de la distribución de la simulación en términos de las posiciones, velocidades y masas de estos **halos de materia oscura**, que son la cantidades de interés al momento de vincular las predicciones de los modelos con las observaciones. Estos halos sirven en la construcción de **catálogos ficticios** que se son comparables con mapas de la distribución de galaxias en el Universo.

Para la realización de simulaciones que incluyan efectos de diferentes modelos de energía oscura hay tres posibilidades: campos homogéneos de energía oscura, campos inhomogéneos de energía oscura y modelos con inhomogeneidad a gran escala [3]. En este proyecto nos centraremos en los modelos Λ CDM y en los homogéneos de energía oscura que se pueden incluir en simulaciones hechas con la maquinaria Λ CDM a través de una parametrización para la evolución del término $\Omega_{DE}(z)$.

8.3. Observaciones

Las observaciones del Universo a gran escala empezaron a tener un rol central en la astronomía observacional y en la cosmología con dos colaboraciones: el Sloan Digital Sky Survey (SDSS) [23] y el Two Degree Field Galaxy Redshift Survey (2dFGRS) [5]. El objetivo principal de estas campañas observacionales fue el de tomar espectros de cerca de un millón de galaxias del Universo local sobre una gran área del cielo. A partir de estas observaciones de la estructura del Universo a gran escala se pueden inferir diferentes parámetros cosmológicos.

Dentro de las mediciones más importantes a partir de estas dos misiones ha sido el de la densidad

de materia cosmológica Ω_m [16] y el pico en la función de correlación correspondiente a la Oscilación Acústica de Bariones (OAB) [8]. Actualmente las observaciones recientes de la OAB son las que proveen una de las formas más competitivas de acotar la historia de expansión del Universo [?].

En cuanto a las mediciones del crecimiento de estructura (cotas sobre la forma de la función $D(t)$ mencionada en la sección sobre teoría) estas se han a través de la cuantificación de la distribución de las posiciones de las galaxias en la dirección radial y perpendicular al observador [18], aunque los resultados son de una precisión que todavía no permite distinguir claramente entre el modelo estándar y varias teorías modificadas de la gravedad.

9. Estado del arte

9.1. Pruebas de parámetros cosmológicos

Con la puesta en marcha de ambiciosos programas observacionales para cuantificar la Energía Oscura durante la siguiente década, los esfuerzos teóricos se han multiplicado para encontrar formas de medir la expansión acelerada con alta precisión. Existen varios métodos observacionales utilizados en la actualidad para hacer este tipo de mediciones. Entre ellos se destacan:

1. La escala de la Oscilación Acústica de Bariones (OAB).
2. El crecimiento de estructura a través de las Distorsiones en el Espacio de Redshift (DER).
3. El bosque Lyman- α de cuasares distantes.
4. Efecto de lente gravitacional débil.
5. Mediciones de distancias con supernovas.
6. Abundancia de cúmulos de galaxias.

El interés observacional de misiones que observan desde la Tierra los métodos más interesantes para la siguiente década son los primeros tres. En el caso de misiones que observarán desde el espacio todos los seis métodos son considerados.

El método de OAB, desde la primera detección en el 2005 [8], ha sido uno de los preferidos para obtener mediciones precisas de la historia de expansión. Ejemplos recientes de estas mediciones [4, 2] para galaxias más distantes han sido hechas por BOSS (<http://www.sdss3.org/surveys/boss.php>) y WiggleZ (<http://wigglez.swin.edu.au/site/>). Ambas son colaboraciones de cientos de científicos, dada la gran cantidad de las observaciones, reducción de datos y simulaciones que deben ser hechas para obtener resultados sobre la historia de expansión del Universo.

Usando los mismos datos de las observaciones ha sido posible medir las DER para poner cotas sobre la función $D(t)$ que describe el crecimiento de estructura [18]. Los resultados muestran consistencia con una cosmología LCDM donde la gravedad está descrita por la Relatividad General, aunque los datos dan una leve preferencia a valores donde la interacción gravitacional es levemente menor a las predicciones de la Relatividad General.

Otra vía de nuestro interés para acotar parámetros cosmológicos es la que tiene que ver con pruebas novedosas que van a beneficiarse de los grandes volúmenes que serán observados con futuras campañas observacionales. Entre estos se encuentran

- El efecto Alcock-Paczinsky sobre la estructura a gran escala [20].
- Las eventos de colisiones extremas, como el Bullet Cluster o el Bullet Group [10, 9].

9.2. Campañas observacionales

El objetivo de campañas observacionales que empiezan en ~ 5 años es observar al menos un orden de magnitud más de galaxias en un rango de redshift $0,7 < z < 2,0$ que extiende las observaciones hechas hasta ahora en el rango $z < 0,7$. Dentro de estas misiones se destacan:

- **Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI)**. Empezará a tomar datos en el 2018. Espera tomar espectros de cerca de +20 millones de galaxias utilizando el telescopio de 4 metros en el Kitt Peak Observatory en Estados Unidos [14].
- **4MOST**. Empezará a tomar datos en el 2019. Espera tomar espectros de cerca de +20 millones de estrellas galaxias con el telescopio de 4 metros VISTA en Chile. Su objetivo principal es hacer ciencia de la formación de la Vía Láctea [7].
- **Euclid**. Empezará a tomar datos en el 2021. Será un telescopio espacial de 1.2 metros. Espera tomar espectros de cerca de 52 millones de galaxias. [1].

La ventaja de DESI sobre 4MOST es que estará completamente dedicado a observar galaxias; y sobre Euclid es que tomará datos 3 años antes. De esta manera DESI ofrece una oportunidad única para hacer cosmología observacional en los siguientes años.

DESI está entre el 2014-2017 en la fase de planeación del survey y construcción del instrumento. **Es justamente en esta fase en la que este proyecto espera hacer sus contribuciones a DESI.**

9.3. Simulaciones para el diseño de DESI

En esta fase de diseño una de los objetivos principales es lograr la simulación completa del instrumento, algo que se conoce como **end-to-end simulation**. Esto implica simular eventos como la secuencia en la que el telescopio apuntará al cielo, cómo se van a ubicar las fibras ópticas sobre las galaxias observadas, los espectros de cada una de las galaxias observadas con ruido instrumental realista, la toma de espectros sobre cámaras CCD, la extracción de la información hasta la deducción del redshift de cada una de las galaxias observadas. Luego de esto se puede aplicar cada métodos (OAB, DER, etc) para ver con qué precisión se pueden acotar los parámetros cosmológicos.

Central a este esfuerzo es crear catálogos de Universos ficticios a partir de simulaciones de N-cuerpos. Esto permitirá hacer las simulaciones end-to-end realistas y al mismo tiempo entrenar los algoritmos que finalmente van a utilizar los datos observacionales para medir los datos sobre la expansión del Universo. El estado del arte en estas simulaciones se compone por volúmenes

cúbicos de universos de lado $1000 - 10000h^{-1}\text{Mpc}$ con un número de partículas entre los rangos $1024^3 - 7120^3$ en una cosmología estándar LCDM. Estas simulaciones han sido hechas por diferentes grupos, entre ellas caben destacar LASDAMAS en Stanford (<http://lss.phy.vanderbilt.edu/lasdamas/team.html>), HorizonRun en KIAS (hecha por nuestro asesor Changbom Park y su grupo) (<http://sdss.kias.re.kr/astro/Horizon-Run23/>) y MultiDark (hecha por el equipo de nuestro asesor Stefan Gottloeber) (<http://www.multidark.org/MultiDark/>). También cabe resaltar la serie de simulaciones CODECS que incluye simulaciones en diferentes familias de energía oscura (http://www.marcobaldi.it/web/CoDECS_summary.html).

10. Objetivos

10.1. Objetivos generales

Cuantificar la influencia de los parámetros cosmológicos en la estructura del Universo a gran escala con herramientas y métodos competitivos y útiles para la comunidad internacional en Cosmología. Para ello nos proponemos:

1. Realizar simulaciones de formación de estructura a gran escala en el Universo.
2. Contribuir al diseño de DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument) un experimento de siguiente generación para la medición de la historia de la expansión del Universo.
3. Utilizar datos observacionales de la distribución de galaxias a gran escala para acotar valores de parámetros cosmológicos.

El software generado por el proyecto **CoCO** estará a disponibilidad de la comunidad astronómica internacional a través de repositorios públicos. En el caso de los datos se conservarán en discos duros con backup y estarán disponibles para la comunidad astronómica internacional bajo solicitud.

10.2. Objetivos específicos

1. Desarrollar la Infraestructura computacional necesaria para hacer simulaciones cosmológicas; incluyendo la adaptación o desarrollo de componentes de software necesarias y la compra del hardware apropiado. Para esto prevemos la compra de 6TB de memoria con backup y un blade de 24 procesadores y 512GB de RAM para poder tener capacidad de cómputo dedicada exclusivamente a **CoCO**.
2. Hacer y analizar simulaciones de formación de estructura a gran escala en Universos dominados por materia oscura en una cosmología LCDM. Estas simulaciones tendrán $1000 h^{-1}\text{Mpc}$ de lado con 1024^3 partículas. Por cada simulación se guardarán en disco 5 snapshots con las posiciones y velocidades de todas las partículas. Esto representa cerca de 300 GB en espacio de disco y cerca de 15000 horas de CPU (cerca de 10 días sobre 64 procesadores). Esta simulación utilizaría cerca de 120GB de RAM al momento de correr. Estas condiciones son realizables en el cluster de la Universidad de los Andes, el cual tiene cerca de 500 procesadores y cerca de 1TB de RAM distribuida.

3. Hacer y analizar simulaciones de formación de estructura a gran escala en Universos dominados por materia oscura en cosmologías w CDM con las mismas condiciones técnicas de las simulaciones LCDM.
4. Construir catálogos ficticios de galaxias; incluyendo la adaptación o desarrollo de componentes de software necesarias.
5. Colaborar en el diseño del experimento DESI, probando diferentes Secuencias de observación del cielo; incluyendo la adaptación o desarrollo de componentes de software necesarias.
6. Colaborar en el diseño del experimento DESI, probando diferentes algoritmos de distribución de fibras ópticas sobre galaxias; incluyendo la adaptación o desarrollo de componentes de software necesarias.
7. Colaborar en el diseño del experimento DESI, ayudando en la integración del software que simula el experimento de manera completa, desde las observaciones hasta la determinación de los redshifts de las galaxias observadas.
8. Cuantificar el efecto Alcock-Paczinsky sobre el beta-skeleton construido sobre la distribución tridimensional de galaxias.
9. Cuantificar las estadísticas de pares de velocidades de encuentros extremos de pares de cúmulos de galaxias en cosmologías LCDM y w CDM.
10. Cuantificar el efecto de Redshift Space Distortions sobre las estadísticas de clustering de galaxias.

11. Metodología

Para lograr los objetivos de este proyecto hemos asociado a cada uno de los objetivos específicos una serie de tareas que deben ser completadas. Jaime E. Forero Romero actuará como coordinador de cada una de estas tareas y seguirá su desarrollo y cumplimiento.

Cada una de estas tareas tiene responsables para su ejecución. Estos responsables serán:

- Dr. Jaime E. Forero Romero [**PROF**].
- Felipe Gómez, estudiante de doctorado [**GRAD1**].
- Estudiante de doctorado por determinar [**GRAD2**].
- Asistentes técnicos de Uniandes [**TECN**].

A continuación relacionamos cada uno de los objetivos específicos con la lista de tareas y sus responsables. En los casos donde se espera colaboración de los asesores externos está expresado de manera explícita.

T1. Infraestructura computacional para hacer simulaciones cosmológicas

- T1.1 [TECN] Compra, instalación y mantenimiento de 6TB espacio de disco con backup para almacenar los datos originales de las simulaciones.
- T1.2 [TECN] Compra, instalación y mantenimiento de un blade de procesamiento con 24 procesadores con 512GB para poder analizar y postprocesar las simulaciones.
- T1.3 [GRAD1][PROF] Instalación del software abierto N-GenIC¹ para la generación de condiciones iniciales.
- T1.4 [GRAD1][PROF] Instalación del software abierto Gadget2² para hacer simulaciones de N-cuerpos cosmológicas.
- T1.5 [GRAD1][PROF] Instalación del software abierto Rockstar³ para la detección de halos de materia oscura.
- T1.6 [GRAD1][GRAD2][PROF] Organización de una escuela internacional en cosmología computacional (duración de un mes) para formar recurso humano con capacidad de utilizar hardware y software para hacer y analizar simulaciones de formación de estructura a gran escala. Dr. Stefan Gottloeber será uno de los profesores.

T2. Simulaciones de formación de estructura a gran escala en una cosmología LCDM.

- T2.1 [GRAD1] Generar las condiciones iniciales para 5 volúmenes cosmológicos.
- T2.2 [GRAD1] Correr las simulaciones para 5 volúmenes LCDM.
- T2.3 [GRAD1] Controlar la calidad de los 5 volúmenes LCDM. Esto se hará con la asesoría de Dr. Stefan Gottloeber.
- T2.4 [GRAD1] Identificar los halos de materia oscura en los 5 volúmenes LCDM.

T3. Simulaciones de formación de estructura en una cosmología w CDM.

- T3.1 [GRAD1] Correr 5 simulaciones w CDM para las mismas condiciones iniciales pero diferentes valores de w .
- T3.2 [GRAD1] Controlar la calidad de los 5 volúmenes w CDM. Esto se hará con la asesoría de Dr. Stefan Gottloeber.
- T3.3 [GRAD1] Identificar los halos de materia oscura en los 5 volúmenes w CDM.

¹<http://www.mpa-garching.mpg.de/gadget/>

²<http://www.mpa-garching.mpg.de/gadget/>

³<https://bitbucket.org/gfcstanford/rockstar>

T4. Preparar catálogos ficticios de galaxias

- T4.1 **[GRAD1][PROF]** Escribir software para la generación de catálogos ficticios de galaxias aleatorios (i.e. sin ningún tipo de clustering).
- T4.2 **[GRAD1][PROF]** Adaptar el código `make_survey`⁴ para generar catálogos fictios de galaxias a partir de catálogos de halos materia oscura.

T5. Secuencias de observación para el experimento DESI

- T5.1 **[PROF]** Escribir software que simule la secuencia de observación de DESI sobre un catálogo de galaxias generado aleatoriamente. Con asesoría de Dr. Robert Cahn en Berkeley.
- T5.2 **[PROF]** Escribir software que simule la secuencia de observación de DESI sobre un catálogo de galaxias generado a partir de una simulación de N-cuerpos. Con asesoría de Dr. Robert Cahn en Berkeley.

T6. Distribución de fibras ópticas en el experimento DESI

- T6.1 **[PROF]** Escribir software que simule la asignación de fibras ópticas sobre un catálogo de galaxias generadas aleatoriamente. Con asesoría de Dr. Robert Cahn en Berkeley.
- T6.2 **[PROF]** Escribir software que simule la asignación de fibras ópticas sobre un catálogo de galaxias generado a partir de una simulación de N-cuerpos. Con asesoría de Dr. Robert Cahn en Berkeley.

T7. Simulación completa (end-to-end) del experimento DESI.

- T7.1 **[PROF]** Integrar en la base de código de DESI el software para preparar catálogos ficticios de galaxias aleatorios. Con asesoría de Dr. Robert Cahn en Berkeley. Viaje a Berkeley por 2 semanas.
- T7.2 **[GRAD1][PROF]** Integrar en la base de código de DESI el software para preparar catálogos ficticios de galaxias a partir de simulaciones de N-cuerpos. Con asesoría de Dr. Robert Cahn en Berkeley. Viaje a Berkeley por 2 semanas.
- T7.3 **[PROF]** Integrar en la base de código de DESI el software para definir las secuencias de observación del experimento. Con asesoría de Dr. Robert Cahn en Berkeley.
- T7.4 **[PROF]** Integrar el código completo de simulación end-to-end de DESI. Con asesoría de Dr. Robert Cahn en Berkeley.
- T7.5 **[PROF]** Producir simulaciones completas de simulación end-to-end de DESI. Desde las observaciones hasta la estimación de redshifts de galaxias observadas. Con asesoría de Dr. Robert Cahn en Berkeley. Visita a Berkeley por 2 semanas.

⁴https://github.com/mockFactory/make_survey

T8. Efecto Alcock-Paczinsky (AP) sobre el Beta Skeleton

- T8.1 **[GRAD2]** Medir la intensidad del efecto AP sobre catálogos ficticios de galaxias creados a partir de simulaciones de N-cuerpos. Con asesoría de Dr. Changbom Park en Seul
- T8.2 **[PROF]** Medir la intensidad del efecto AP sobre observaciones reales de galaxias. Con asesoría de Dr. Changbom Park en Seul. Viaje a Seul por 2 semanas.

T9. Estadísticas de pares de velocidades

- T9.1 **[GRAD2][PROF]** Cuantificar el número de pares de cúmulos de galaxias con velocidades extremas en simulaciones de N-cuerpos en cosmologías LCDM.
- T9.2 **[GRAD2]** Cuantificar el número de pares de cúmulos de galaxias con velocidades extremas en simulaciones de N-cuerpos en cosmologías ω CDM. Viaje a Seoul por 2 semanas.

Efecto de RSD sobre estadísticas de clustering

- T10.1 **[GRAD2]** Cuantificar el efecto de RSD sobre catálogos ficticios de galaxias creados a partir de simulaciones de N-cuerpos en cosmologías LCDM.
- T10.2 **[GRAD2]** Cuantificar el efecto de RSD sobre catálogos ficticios de galaxias creados a partir de simulaciones de N-cuerpos en cosmologías ω CDM.
- T10.3 **[GRAD2]** Cuantificar el efecto de RSD sobre los catálogos de posiciones y redshift creados a partir de la herramienta de simulación end-to-end de DESI. Con asesoría de Dr. Robert Cahn en Berkeley. Visita a Berkeley por 2 semanas.

12. Resultados esperados de la investigación

Al final del proyecto se debe haber generado nuevo conocimiento sobre las siguientes puntos

- Utilización de sistemas de cómputo masivamente para la realización de simulaciones de estructura del Universo a gran escala.
- Entendimiento del impacto de la repartición de fibras ópticas y de la estrategia de observación del experimento DESI en su capacidad para acotar los parámetros cosmológicos.
- Cuantificación de la abundancia de colisiones extremas entre pares de halos de materia oscura bajo diferentes cosmologías de la familia w CDM.
- Cotas de los parámetros cosmológicos a través de pruebas que utilizan el test de Alcock-Paczynski para cuantificar la distribución anisotrópica de galaxias a gran escala.
- Metodologías para analizar datos de la distribución de galaxias a gran escala y obtener información de relevancia cosmológica a partir de las distorsiones en el espacio de redshift.

13. Resultados esperados - Productos

A continuación relacionamos los resultados esperados de acuerdo

- Avances de una tesis doctoral en temas relacionados con la planeación de DESI.
- Avances de una tesis doctoral en temas relacionados con estimación de parámetros cosmológicos a partir de datos observacionales.
- Presentación de resultados en al menos dos eventos internacionales.
- Presentación de resultados en el congreso colombiano de física en el 2015.
- Presentación de resultados en el congreso colombiano de astrofísica en el 2016.
- Publicación de al menos dos artículos en revistas internacionales indexadas.
- Producción de al menos un producto de software para la simulación de instrumentos de espectroscopía masiva.
- Organizar una escuela internacional de cosmología computacional, Junio del 2015, en la Universidad de los Andes.
- Creación de una página web formato weblog dedicada a mostrar los avances del proyecto.
- Creación de una página web para hacer disponibles los datos de las simulaciones a la comunidad astronómica nacional e internacional.
- Al menos dos charlas pública de divulgación sobre los temas de cosmología computacional y observacional.

14. Trayectoria del equipo de investigación

Actualmente el equipo de investigación se encuentra compuesto por Dr. Jaime E. Forero-Romero y el estudiante de doctorado Felipe Gómez. Hay dos estudiantes que empezarán su doctorado en la Universidad de los Andes en el tema de cosmología durante el primer semestre del 2015. Uno de ellos estará involucrado en este proyecto.

Las investigaciones actuales de Felipe Gómez están centradas en el análisis de simulaciones cosmológicas como trabajo preparatorio. El tema central de su trabajo actual es la estimación de la relación entre masa de materia oscura y tasa de formación estelar para galaxias a alto redshift. Esto va a ser útil al momento de generar catálogos ficticios de galaxias a partir de las simulaciones.

En el caso de Jaime Forero se encuentra trabajando en la parte de distribución de fibras ópticas. El siguiente artículos en colaboración con científicos de DESI se encuentra enviado:

Target allocation yields for massively multiplexed spectroscopic surveys with fibers, Will Saunders, Scott Smedley, Peter Gillingham, **Jaime E. Forero-Romero**, Stephanie Jouvel, Brian Nord,

SPIE submitted.

En paralelo la cooperación con KIAS en Corea del Sur ha avanzado de tal manera a tener acceso a catálogos ficticios contruidos con la simulación Horizon Run y empezar a trabajar sobre el Alcock-Paczynski test.

En cuanto a eventos extremos como prueba de LCDM, recientemente el siguiente paper fue publicado.

The abundance of Bullet Groups in Λ CDM, J. G. Fernández-Trincado, **J. E. Forero-Romero**, G. Foex, V. Motta, T. Verdugo, V. Motta, ApJ Letter, 787, L32, 2014.

En la Universidad de los Andes la compra de los equipos de cómputo en paralelo ya empezó para tenerlos funcionando a finales del 2014. Entretanto hay una tesis de pregrado de Física que se centra en hacer simulaciones de estructura a gran escala con diferentes cosmologías y una resolución baja (512^3 partículas) como preparación del trabajo del proyecto **CoCO**.

15. Posibles evaluadores

Octavio Valenzuela. Email `octavio at astro unam mx` (UNAM, México)

Nelson Padilla. Email `npadilla at astro puc cl` (PUC, Chile)

Patricia Tissera. Email `patricia at iafe uba ar` (UBA, Argentina)

16. Cronograma

El cronograma está estructurado a partir de las tareas y responsables especificadas en la Sección 11. El diagrama de Gantt se muestra en la Figura 1.

- SEM-1** T1.1 [**TECN**] Compra, instalación y mantenimiento de 3TB espacio de disco con backup para almacenar los datos originales de las simulaciones.
- T1.2 [**TECN**] Compra, instalación y mantenimiento de un blade de procesamiento con 24 procesadores con 512GB para poder analizar y postprocesar las simulaciones.
- T1.4 [**GRAD1**][**PROF**] Instalación del software abierto N-GenIC⁵ para la generación de condiciones iniciales.
- T1.3 [**GRAD1**][**PROF**] Instalación del software abierto Gadget2⁶ para hacer simulaciones de N-cuerpos cosmológicas.
- T1.5 [**GRAD1**][**PROF**] Instalación del software abierto Rockstar⁷ para la detección de halos de materia oscura.

⁵<http://www.mpa-garching.mpg.de/gadget/>

⁶<http://www.mpa-garching.mpg.de/gadget/>

⁷<https://bitbucket.org/gfstanford/rockstar>

	Tarea	Semestre 1	Semestre 2	Semestre 3	Semestre 4	Semestre 5	Semestre 6
1	T1.1						
2	T1.2						
3	T1.3						
4	T1.4						
5	T1.5						
6	T1.6						
7	T2.1						
8	T2.2						
9	T2.3						
10	T2.4						
11	T3.1						
12	T3.2						
13	T3.3						
14	T4.1						
15	T4.2						
16	T5.1						
17	T5.2						
18	T6.1						
19	T6.2						
20	T7.1						
21	T7.2						
22	T7.3						
23	T7.4						
24	T7.5						
25	T8.1						
26	T8.2						
27	T9.1						
28	T9.2						
29	T10.1						
30	T10.2						
31	T10.3						

Figura 1: Diagrama de Gantt que resume la repartición de tareas del cronograma (Sección 16).

T1.6 **[GRAD1][GRAD2][PROF]** Organización de una escuela internacional en cosmología computacional (duración de un mes) para formar recurso humano con capacidad de utilizar hardware y software para hacer y analizar simulaciones de formación de estructura a gran escala. Dr. Stefan Gottloeber será uno de los profesores.

SEM 2 T4.1 **[GRAD1][PROF]** Escribir software para la generación de catálogos ficticios de galaxias aleatorios (i.e. sin ningún tipo de clustering).

T5.1 **[PROF]** Escribir software que simule la secuencia de observación de DESI sobre un catálogo de galaxias generado aleatoriamente. Con asesoría de Dr. Robert Cahn en Berkeley.

T6.1 **[PROF]** Escribir software que simule la asignación de fibras ópticas sobre un catálogo de galaxias generadas aleatoriamente. Con asesoría de Dr. Robert Cahn en Berkeley.

T7.1 **[PROF]** Integrar en la base de código de DESI el software para preparar catálogos ficticios de galaxias aleatorios. Con asesoría de Dr. Robert Cahn en Berkeley. Viaje a Berkeley por dos semanas.

T2.1 **[GRAD1]** Generar las condiciones iniciales para 5 volúmenes cosmológicos.

T2.2 **[GRAD1]** Correr las simulaciones para 5 volúmenes LCDM.

T2.3 **[GRAD1]** Controlar la calidad de los 5 volúmenes LCDM. Esto se hará con la asesoría de Dr. Stefan Gottloeber.

T2.4 **[GRAD1]** Identificar los halos de materia oscura en los 5 volúmenes LCDM.

T8.1 **[GRAD2]** Medir la intensidad del efecto AP sobre catálogos ficticios de galaxias creados a partir de simulaciones de N-cuerpos. Con asesoría de Dr. Changbom Park en Seoul

T8.2 **[PROF]** Medir la intensidad del efecto AP sobre observaciones reales de galaxias. Con asesoría de Dr. Changbom Park en Seoul. Viaje a Seoul por dos semanas.

SEM-3 T1.1 **[TECN]** Compra, instalación y mantenimiento de 3TB espacio de disco con backup para almacenar los datos originales de las simulaciones.

T4.2 **[GRAD1][PROF]** Adaptar el código `make_survey`⁸ para generar catálogos ficticios de galaxias a partir de catálogos de halos materia oscura.

T5.2 **[PROF]** Escribir software que simule la secuencia de observación de DESI sobre un catálogo de galaxias generado a partir de una simulación de N-cuerpos. Con asesoría de Dr. Robert Cahn en Berkeley.

T6.2 **[PROF]** Escribir software que simule la asignación de fibras ópticas sobre un catálogo de galaxias generado a partir de una simulación de N-cuerpos. Con asesoría de Dr. Robert Cahn en Berkeley.

T7.2 **[GRAD1][PROF]** Integrar en la base de código de DESI el software para preparar catálogos ficticios de galaxias a partir de simulaciones de N-cuerpos. Con asesoría de Dr. Robert Cahn en Berkeley. Viaje a Berkeley por 2 semanas.

⁸https://github.com/mockFactory/make_survey

- SEM-4** T3.1 [**GRAD1**]Correr 5 simulaciones w CDM para las mismas condiciones iniciales pero diferentes valores de w .
- T3.2 [**GRAD1**]Controlar la calidad de los 5 volúmenes w CDM. Esto se hará con la asesoría de Dr. Stefan Gottloeber.
- T3.3 [**GRAD1**]Identificar los halos de materia oscura en los 5 volúmenes w CDM.
- T9.1 [**GRAD2**][**PROF**]Cuantificar el número de pares de cúmulos de galaxias con velocidades extremas en simulaciones de N-cuerpos en cosmologías LCDM.
- T9.2 [**GRAD2**]Cuantificar el número de pares de cúmulos de galaxias con velocidades extremas en simulaciones de N-cuerpos en cosmologías ω CDM. Viaje a Seul por 2 semanas.
- SEM-5** T7.3 [**PROF**]Integrar en la base de código de DESI el software para definir las secuencias de observación del experimento. Con asesoría de Dr. Robert Cahn en Berkeley.
- T10.1 [**GRAD2**]Cuantificar el efecto de RSD sobre catálogos ficticios de galaxias creados a partir de simulaciones de N-cuerpos en cosmologías LCDM.
- T10.2 [**GRAD2**]Cuantificar el efecto de RSD sobre catálogos ficticios de galaxias creados a partir de simulaciones de N-cuerpos en cosmologías ω CDM.
- SEM-6** T7.4 [**PROF**]Integrar el código completo de simulación end-to-end de DESI. Con asesoría de Dr. Robert Cahn en Berkeley.
- T7.5 [**PROF**]Producir simulaciones completas de simulación end-to-end de DESI. Desde las observaciones hasta la estimación de redshifts de galaxias observadas. Con asesoría de Dr. Robert Cahn en Berkeley. Visita a Berkeley por 2 semanas.
- T10.3 [**GRAD2**]Cuantificar el efecto de RSD sobre los catálogos de posiciones y redshift creados a partir de la herramienta de simulación end-to-end de DESI. Con asesoría de Dr. Robert Cahn en Berkeley. Visita a Berkeley por 2 semanas.

17. Impacto ambiental

Las actividades del proyecto se desarrollaran en la Universidad de los Andes. El trabajo principal consiste en escribir software y hacer simulaciones numéricas usando el cluster de computación de alto rendimiento en la Universidad de los Andes. La operación de estas unidades de cómputo requiere condiciones de electricidad y enfriamiento que son hechas por la Dirección de Tecnologías de Servicios de la Información (DSIT) de la Universidad de los Andes siguiendo todas las normas de seguridad pertinentes para su funcionamiento adecuado para que no represente un impacto al medio ambiente ni a la salud humana. Las demás estaciones de trabajo de los miembros del equipo son pequeños y no producen ningún impacto ambiental al momento de ser utilizadas.

Referencias

- [1] J. Amiaux, R. Scaramella, Y. Mellier, B. Altieri, C. Burigana, A. Da Silva, P. Gomez, J. Hoar, R. Laureijs, E. Maiorano, D. Magalhes Oliveira, F. Renk, G. Saavedra Criado, I. Tereno, J. L. Auguères, J. Brinchmann, M. Cropper, L. Duvet, A. Ealet, P. Franzetti, B. Garilli, P. Gondoin, L. Guzzo, H. Hoekstra, R. Holmes, K. Jahnke, T. Kitching, M. Meneghetti, W. Percival, and S. Warren. Euclid mission: building of a reference survey. In *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 8442 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, September 2012.
- [2] L. Anderson, É. Aubourg, S. Bailey, F. Beutler, V. Bhardwaj, M. Blanton, A. S. Bolton, J. Brinkmann, J. R. Brownstein, A. Burden, C.-H. Chuang, A. J. Cuesta, K. S. Dawson, D. J. Eisenstein, S. Escoffier, J. E. Gunn, H. Guo, S. Ho, K. Honscheid, C. Howlett, D. Kirkby, R. H. Lupton, M. Manera, C. Maraston, C. K. McBride, O. Mena, F. Montesano, R. C. Nichol, S. E. Nuza, M. D. Olmstead, N. Padmanabhan, N. Palanque-Delabrouille, J. Parejko, W. J. Percival, P. Petitjean, F. Prada, A. M. Price-Whelan, B. Reid, N. A. Roe, A. J. Ross, N. P. Ross, C. G. Sabiu, S. Saito, L. Samushia, A. G. Sánchez, D. J. Schlegel, D. P. Schneider, C. G. Scoccola, H.-J. Seo, R. A. Skibba, M. A. Strauss, M. E. C. Swanson, D. Thomas, J. L. Tinker, R. Tojeiro, M. V. Magaña, L. Verde, D. A. Wake, B. A. Weaver, D. H. Weinberg, M. White, X. Xu, C. Yeche, I. Zehavi, and G.-B. Zhao. The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: baryon acoustic oscillations in the Data Releases 10 and 11 Galaxy samples. *MNRAS*, 441:24–62, June 2014.
- [3] M. Baldi. Dark Energy simulations. *Physics of the Dark Universe*, 1:162–193, November 2012.
- [4] C. Blake, T. Davis, G. B. Poole, D. Parkinson, S. Brough, M. Colless, C. Contreras, W. Couch, S. Croom, M. J. Drinkwater, K. Forster, D. Gilbank, M. Gladders, K. Glazebrook, B. Jelliffe, R. J. Jurek, I.-H. Li, B. Madore, D. C. Martin, K. Pimbblet, M. Pracy, R. Sharp, E. Wisnioski, D. Woods, T. K. Wyder, and H. K. C. Yee. The WiggleZ Dark Energy Survey: testing the cosmological model with baryon acoustic oscillations at $z=0.6$. *MNRAS*, 415:2892–2909, August 2011.
- [5] M. Colless, G. Dalton, S. Maddox, W. Sutherland, P. Norberg, S. Cole, J. Bland-Hawthorn, T. Bridges, R. Cannon, C. Collins, W. Couch, N. Cross, K. Deeley, R. De Propris, S. P. Driver, G. Efstathiou, R. S. Ellis, C. S. Frenk, K. Glazebrook, C. Jackson, O. Lahav, I. Lewis, S. Lumsden, D. Madgwick, J. A. Peacock, B. A. Peterson, I. Price, M. Seaborne, and K. Taylor. The 2dF Galaxy Redshift Survey: spectra and redshifts. *MNRAS*, 328:1039–1063, December 2001.
- [6] M. Davis, G. Efstathiou, C. S. Frenk, and S. D. M. White. The evolution of large-scale structure in a universe dominated by cold dark matter. *ApJ*, 292:371–394, May 1985.
- [7] R. S. de Jong, O. Bellido-Tirado, C. Chiappini, É. Depagne, R. Haynes, D. Johl, O. Schnurr, A. Schwobe, J. Walcher, F. Dionies, D. Haynes, A. Kelz, F. S. Kitaura, G. Lamer, I. Minchev, V. Mueller, S. E. Nuza, J.-C. Olaya, T. Piffl, E. Popow, M. Steinmetz, U. Ural, M. Williams,

- R. Winkler, L. Wisotzki, W. R. Ansorge, M. Banerji, E. Gonzalez Solares, M. Irwin, R. C. Kennicutt, D. King, R. G. McMahon, S. Koposov, I. R. Parry, D. Sun, N. A. Walton, G. Finger, O. Iwert, M. Krumpke, J.-L. Lizon, M. Vincenzo, J.-P. Amans, P. Bonifacio, M. Cohen, P. Francois, P. Jagourel, S. B. Mignot, F. Royer, P. Sartoretti, R. Bender, F. Grupp, H.-J. Hess, F. Lang-Bardl, B. Muschielok, H. Bohringer, T. Boller, A. Bongiorno, M. Brusa, T. Dwelly, A. Merloni, K. Nandra, M. Salvato, J. H. Pragt, R. Navarro, G. Gerlofsma, R. Roelfsema, G. B. Dalton, K. F. Middleton, I. A. Tosh, C. Boeche, E. Caffau, N. Christlieb, E. K. Grebel, C. Hansen, A. Koch, H.-G. Ludwig, A. Quirrenbach, L. Sbordone, W. Seifert, G. Thimm, T. Trifonov, A. Helmi, S. C. Trager, S. Feltzing, A. Korn, and W. Boland. 4MOST: 4-metre multi-object spectroscopic telescope. In *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 8446 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, September 2012.
- [8] D. J. Eisenstein, I. Zehavi, D. W. Hogg, R. Scoccimarro, M. R. Blanton, R. C. Nichol, R. Scranton, H.-J. Seo, M. Tegmark, Z. Zheng, S. F. Anderson, J. Annis, N. Bahcall, J. Brinkmann, S. Burles, F. J. Castander, A. Connolly, I. Csabai, M. Doi, M. Fukugita, J. A. Frieman, K. Glazebrook, J. E. Gunn, J. S. Hendry, G. Hennessy, Z. Ivezic, S. Kent, G. R. Knapp, H. Lin, Y.-S. Loh, R. H. Lupton, B. Margon, T. A. McKay, A. Meiksin, J. A. Munn, A. Pope, M. W. Richmond, D. Schlegel, D. P. Schneider, K. Shimasaku, C. Stoughton, M. A. Strauss, M. SubbaRao, A. S. Szalay, I. Szapudi, D. L. Tucker, B. Yanny, and D. G. York. Detection of the Baryon Acoustic Peak in the Large-Scale Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies. *ApJ*, 633:560–574, November 2005.
- [9] J. G. Fernández-Trincado, J. E. Forero-Romero, G. Foex, T. Verdugo, and V. Motta. The Abundance of Bullet Groups in Λ CDM. *ApJL*, 787:L34, June 2014.
- [10] J. E. Forero-Romero, S. Gottloeber, and G. Yepes. Bullet Clusters in the MARENOSTRUM Universe. *ApJ*, 725:598–604, December 2010.
- [11] J. E. Forero-Romero, Y. Hoffman, S. Gottloeber, A. Klypin, and G. Yepes. A dynamical classification of the cosmic web. *MNRAS*, 396:1815–1824, July 2009.
- [12] Y. Hoffman, O. Metuki, G. Yepes, S. Gottloeber, J. E. Forero-Romero, N. I. Libeskind, and A. Knebe. A kinematic classification of the cosmic web. *MNRAS*, 425:2049–2057, September 2012.
- [13] A. Klypin, A. V. Kravtsov, O. Valenzuela, and F. Prada. Where Are the Missing Galactic Satellites? *ApJ*, 522:82–92, September 1999.
- [14] M. Levi, C. Bebek, T. Beers, R. Blum, R. Cahn, D. Eisenstein, B. Flaugher, K. Honscheid, R. Kron, O. Lahav, P. McDonald, N. Roe, D. Schlegel, and representing the DESI collaboration. The DESI Experiment, a whitepaper for Snowmass 2013. *ArXiv e-prints*, August 2013.
- [15] M. J. Mortonson, D. H. Weinberg, and M. White. Dark Energy: A Short Review. *ArXiv e-prints*, December 2014.

- [16] J. A. Peacock, S. Cole, P. Norberg, C. M. Baugh, J. Bland-Hawthorn, T. Bridges, R. D. Cannon, M. Colless, C. Collins, W. Couch, G. Dalton, K. Deeley, R. De Propriis, S. P. Driver, G. Efstathiou, R. S. Ellis, C. S. Frenk, K. Glazebrook, C. Jackson, O. Lahav, I. Lewis, S. Lumsden, S. Maddox, W. J. Percival, B. A. Peterson, I. Price, W. Sutherland, and K. Taylor. A measurement of the cosmological mass density from clustering in the 2dF Galaxy Redshift Survey. *Nature*, 410:169–173, March 2001.
- [17] K. Riebe, A. M. Partl, H. Enke, J. Forero-Romero, S. Gottloeber, A. Klypin, G. Lemson, F. Prada, J. R. Primack, M. Steinmetz, and V. Turchaninov. The MultiDark Database: Release of the Bolshoi and MultiDark cosmological simulations. *Astronomische Nachrichten*, 334:691–708, August 2013.
- [18] L. Samushia, B. A. Reid, M. White, W. J. Percival, A. J. Cuesta, G.-B. Zhao, A. J. Ross, M. Manera, É. Aubourg, F. Beutler, J. Brinkmann, J. R. Brownstein, K. S. Dawson, D. J. Eisenstein, S. Ho, K. Honscheid, C. Maraston, F. Montesano, R. C. Nichol, N. A. Roe, N. P. Ross, A. G. Sánchez, D. J. Schlegel, D. P. Schneider, A. Streblyanska, D. Thomas, J. L. Tinker, D. A. Wake, B. A. Weaver, and I. Zehavi. The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: measuring growth rate and geometry with anisotropic clustering. *MNRAS*, 439:3504–3519, April 2014.
- [19] R. Scoccimarro. Redshift-space distortions, pairwise velocities, and nonlinearities. *PRD*, 70(8):083007, October 2004.
- [20] Y.-S. Song, T. Okumura, and A. Taruya. Broadband Alcock-Paczynski test exploiting redshift distortions. *ArXiv e-prints*, September 2013.
- [21] V. Springel, S. D. M. White, A. Jenkins, C. S. Frenk, N. Yoshida, L. Gao, J. Navarro, R. Thacker, D. Croton, J. Helly, J. A. Peacock, S. Cole, P. Thomas, H. Couchman, A. Evrard, J. Colberg, and F. Pearce. Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars. *Nature*, 435:629–636, June 2005.
- [22] M. White. The Zel’dovich approximation. *MNRAS*, 439:3630–3640, April 2014.
- [23] D. G. York, J. Adelman, J. E. Anderson, Jr., S. F. Anderson, J. Annis, N. A. Bahcall, J. A. Bakken, R. Barkhouser, S. Bastian, E. Berman, W. N. Boroski, S. Bracker, C. Briegel, J. W. Briggs, J. Brinkmann, R. Brunner, S. Burles, L. Carey, M. A. Carr, F. J. Castander, B. Chen, P. L. Colestock, A. J. Connolly, J. H. Crocker, I. Csabai, P. C. Czarapata, J. E. Davis, M. Doi, T. Dombeck, D. Eisenstein, N. Ellman, B. R. Elms, M. L. Evans, X. Fan, G. R. Federwitz, L. Fiscelli, S. Friedman, J. A. Frieman, M. Fukugita, B. Gillespie, J. E. Gunn, V. K. Gurbani, E. de Haas, M. Haldeman, F. H. Harris, J. Hayes, T. M. Heckman, G. S. Hennessy, R. B. Hindsley, S. Holm, D. J. Holmgren, C.-h. Huang, C. Hull, D. Husby, S.-I. Ichikawa, T. Ichikawa, Ž. Ivezić, S. Kent, R. S. J. Kim, E. Kinney, M. Klaene, A. N. Kleinman, S. Kleinman, G. R. Knapp, J. Korienek, R. G. Kron, P. Z. Kunszt, D. Q. Lamb, B. Lee, R. F. Leger, S. Limmongkol, C. Lindenmeyer, D. C. Long, C. Loomis, J. Loveday, R. Lucinio, R. H. Lupton, B. MacKinnon, E. J. Mannery, P. M. Mantsch, B. Margon, P. McGehee, T. A. McKay, A. Meiksin, A. Merelli,

D. G. Monet, J. A. Munn, V. K. Narayanan, T. Nash, E. Neilsen, R. Neswold, H. J. Newberg, R. C. Nichol, T. Nicinski, M. Nonino, N. Okada, S. Okamura, J. P. Ostriker, R. Owen, A. G. Pauls, J. Peoples, R. L. Peterson, D. Petravick, J. R. Pier, A. Pope, R. Pordes, A. Prosapio, R. Rechenmacher, T. R. Quinn, G. T. Richards, M. W. Richmond, C. H. Rivetta, C. M. Rockosi, K. Ruthmansdorfer, D. Sandford, D. J. Schlegel, D. P. Schneider, M. Sekiguchi, G. Sergey, K. Shimasaku, W. A. Siegmund, S. Smee, J. A. Smith, S. Snedden, R. Stone, C. Stoughton, M. A. Strauss, C. Stubbs, M. SubbaRao, A. S. Szalay, I. Szapudi, G. P. Szokoly, A. R. Thakar, C. Tremonti, D. L. Tucker, A. Uomoto, D. Vanden Berk, M. S. Vogeley, P. Waddell, S.-i. Wang, M. Watanabe, D. H. Weinberg, B. Yanny, N. Yasuda, and SDSS Collaboration. The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary. *AJ*, 120:1579–1587, September 2000.

18. Presupuesto

Rubro	Financiado	Contrapartida	Total
Equipos	68.019.081	82.824.427	150.843.508
Bibliografía	0	0	0
Personal científico	0	53.264.193	53.264.193
Materiales e insumos	0	0	0
Servicios Técnicos	0	0	0
Viajes	51.000.000	23.000.000	74.000.000
Salidas de Campo	0	0	0
Eventos Académicos	10.000.000	15.296.367	25.296.367
Publicaciones y patentes	12.000.000	4.000.000	16,000,000
Software	0	0	0
Gastos de Operación	14.801.908	0	14.801.908
Total desembolsado por Colciencias	162.820.989	0	162.820.989
Seguimiento y Evaluación	4.884.630	0	4.884.630
Valor total	159.774.619	178.384.987	338.159.606

Cuadro 1: Resumen Presupuesto. Todos los rubros en COP.

Rubro	Descripción	Año 1	Año 2	Año 3
Viajes	Visita a Berkeley, Estudiante #1	0	6.000.000	0
Viajes	Visita a Seoul, Estudiante#2	0	7.000.000	0
Viajes	Visita a Berkeley, Estudiante#2	0	0	6.000.000
Viajes	Visita a Berkeley, Profesor	0	6.000.000	6.000.000
Viajes	Presentación Internacional, Es- tudiante #1	0	5.000.000	0
Viajes	Presentación Internacional, Es- tudiante #2	0	0	5.000.000
Viajes	Presentación Internacional, Pro- fesor	0	5.000.000	5.000.000
Publicaciones	Astrophysical Journal	0	6.000.000	6.000.000
Eventos	Escuela Internacional de Cosmo- logía	10.000.000	0	0
Equipos	Almacenamiento de 6TB con backup	19.923.663	19.923.663	0
Equipos	Compra de 1 Blade, 24 procesa- dores y 512GB de RAM	28.171.755	0	0
Total por año		59.095.418	54.923.663	28.000.000
Total		148.019.081		

Cuadro 2: Desglose del presupuesto de los items financiados por COLCIENCIAS sin incluir gastos de operación y gastos de seguimiento y evaluación. Todos los rubros en COP.

Rubro	Item	Año 1	Año 2	Año 3	Fuente
Viajes	Escuela Internacional Estudiante #1	5.000.000	0	0	Vicerrectoria investigaciones (FAPA)
Viajes	Escuela Internacional Estudiante #2	5.000.000	0	0	Vicerrectoria investigaciones (FAPA)
Viajes	Visita a Seoul, Profesor	7.000.000	0	0	Vicerrectoria investigaciones (FAPA)
Viajes	Visita a Berkeley, Profesor	6.000.000	0	0	Vicerrectoria investigaciones (FAPA)
Publicaciones	Astrophysical Journal	4.000.000	0	0	Vicerrectoria investigaciones (FAPA)
Personal Científico	Sueldo Profesor	17.060.435	17.746.940	18.456.818	Universidad de los Andes
Eventos	Escuela Internacional de Cosmología	15.296.367	0	0	Silla Sanford, Departamento de Física
Equipos	Cluster para cómputo de alto rendimiento (10 % de la inversion total)	82.824.427	0	0	Departamento de Servicios de Informacion y Tecnologia
Total por año		142.181.229	17.746.940	18.456.818	
Total aportado		178.384.987			

Cuadro 3: Desglose del presupuesto de los items financiados por la Universidad de los Andes El sueldo del profesor corresponde a 7 horas/semana, con aumentos de 4 % anuales. Todos los rubros en COP.

Item	Inscripción	Tiquetes	Manutención	Hotel	Total
Escuela internacional (1 semana)	500.000	3.000.000	500.000	1.000.000	5.000.000
Presentación internacional (1 semana)	500.000	3.000.000	500.000	1.000.000	5.000.000
Visita a Berkeley (2 semanas)	0	3.000.000	1.000.000	2.000.000	6.000.000
Visita a Seoul (2 semanas)	0	6.000.000	1.000.000	0	7.000.000

Cuadro 4: Desglose de los costos asociados a los viajes. Todos los rubros en COP.