

---

Título del proyecto:  
**Simulaciones y Observaciones  
del Universo a Gran Escala**  
**(SOUGE)**

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

<b>1. Conformación del equipo de investigación</b>	<b>3</b>
<b>2. Antecedentes y resultados previos del equipo de investigación</b>	<b>3</b>
<b>3. Temática de investigación</b>	<b>5</b>
<b>4. Resumen ejecutivo</b>	<b>5</b>
<b>5. Palabras clave</b>	<b>5</b>
<b>6. Planteamiento del problema</b>	<b>6</b>
<b>7. Justificación</b>	<b>6</b>
<b>8. Marco conceptual</b>	<b>7</b>
8.1. Teoría . . . . .	7
8.2. Simulaciones . . . . .	8
8.3. Observaciones . . . . .	9
<b>9. Estado del arte</b>	<b>9</b>
9.1. Pruebas observacionales de parámetros cosmológicos . . . . .	9
9.2. Campañas observacionales . . . . .	10
9.3. Simulaciones para el diseño de DESI . . . . .	11
<b>10.Objetivos</b>	<b>12</b>
10.1. Objetivos generales . . . . .	12
10.2. Objetivos específicos . . . . .	12
<b>11.Metodología</b>	<b>13</b>
<b>12.Resultados esperados de la investigación</b>	<b>15</b>
<b>13.Resultados esperados - Productos</b>	<b>16</b>
<b>14.Trayectoria del equipo de investigación</b>	<b>16</b>
<b>15.Posibles evaluadores</b>	<b>17</b>
<b>16.Cronograma</b>	<b>17</b>
<b>17.Impacto ambiental</b>	<b>18</b>
<b>18.Presupuesto</b>	<b>23</b>

## 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 para la actual propuesta 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 18 últimos meses del proyecto. Dedicación: 20 horas / semana.

Con el apoyo de los siguientes asesores internacionales:

- Peder Norberg, PhD. Científico en Durham University (Reino Unido).

Este proyecto es parte de las labores de la Universidad de los Andes en la siguiente colaboración internacional.

- Colaboración internacional Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI).

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

- Jheison Leonardo Rodríguez. Ingeniero de cómputo del departamento de Física.
- Juan Pablo Mallarino. Físico, coordinador del centro de de cómputo de alto rendimiento de la Universidad de los Andes.

## 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 3 años de trabajo como investigador/profesor en el grupo de Astrofísica de la Universidad de los Andes.

Durante el 2015 se formalizó la entrada de la Universidad de los Andes en la colaboración internacional 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. DESI medirá los espectros de cerca de 20 millones de galaxias para crear un mapa 3D del Universo con profundidad de 10mil millones de años luz. Dentro de esta colaboración se ha trabajado en conjunto al grupo de simulaciones de la Durham University representado por el Dr. Peder Norberg.

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 planeación y diseño de DESI.

- *The Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI): Tiling and Fiber Assignment* Cahn, Robert N.; Bailey, Stephen J.; Dawson, Kyle S.; **Forero Romero, Jaime**; Schlegel, David J.; White, Martin; DESI Collaboration, American Astronomical Society, AAS Meeting #225, #336.10, (2015)
- *The Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI): Data Systems* Bailey, Stephen; Bolton, Adam S.; Cahn, Robert N.; Dawson, Kyle; **Forero Romero, Jaime**; Guy, Julien; Kisner, Theodore; Moustakas, John; Nugent, Peter E.; Schlegel, David J.; Stark, Casey; Weaver, Benjamin; DESI Collaboration, American Astronomical Society, AAS Meeting #225, #336.09, (2015)
- *Target allocation yields for massively multiplexed spectroscopic surveys with fibers* Saunders, Will; Smedley, Scott; Gillingham, Peter; **Forero-Romero, Jaime E.**; Jovel, Stephanie; Nord, Brian, Proceedings of the SPIE, Volume 9150, id. 915023 10 pp. (2014).

En el tema de estudios cosmológicos de formación de estructura del Universo a gran escala.

- *Cosmological Constraints from the Redshift Dependence of the Alcock-Paczynski Test: Galaxy Density Gradient Field* Li, Xiao-Dong; Park, Changbom; **Forero-Romero, J. E.**; Kim, Juhan, ApJ, 796, 2, 137, (2014)
- *Cosmic web alignments with the shape, angular momentum and peculiar velocities of dark matter halos* **Forero-Romero J.E.**, Contreras S., Padilla N., MNRAS, 443, 2, 1090, (2014)
- *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)
- *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)

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 de la expansión acelerada del Universo (Premio Nobel de Física 2011). Hoy en día una de las fronteras de la investigación en esta área es la **observación del Universo a gran escala** para inferir la historia de expansión del Universo.

El objetivo de esta área de investigación es entonces crear grandes mapas tridimensionales del Universo observable. 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]. Otros 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 [16]. Las **simulaciones computacionales** juegan un rol central en estos esfuerzos observacionales para medir el Universo. Ellas son necesarias para traducir las premisas teóricas en observables. Es decir, son un puente entre la teoría y la observación. Además sirven para diseñar y preparar nuevas campañas observacionales. El objetivo es simular todo antes de empezar a medir.

**La presente propuesta tiene como objetivo principal entender, a través de simulaciones, los límites observaciones para medir la estructura del Universo a gran escala.** Este trabajo se hará principalmente dentro del marco de la colaboración internacional DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument). DESI es una colaboración internacional de más de 100 científicos que construirá un 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 [12].

Alcanzar nuestro objetivo principal implica desarrollar nuevo software y procesar datos existentes para estudiar fenómenos cosmológicos dentro de universos virtuales. En este proceso utilizaremos el cluster de 480 procesadores de las Instalaciones para Cómputo de Alto Rendimiento de la Universidad de los Andes que fueron puestas en funcionamiento a comienzos del 2015, así como infraestructura computacional común a la colaboración DESI.

### 5. Palabras clave

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

## 6. Planteamiento del problema

La pregunta que dirige la investigación de este proyecto es: ¿Cuál es la estructura del Universo en el que vivimos?

Nuestro objetivo principal es crear diferentes universos virtuales para estudiarlos como lo haría un observador. Con esto podremos encontrar una correspondencia entre rasgos observables y parámetros o características intrínsecas de nuestro Universo.

En este trabajo partimos del modelo estándar de la cosmología establecido en las últimas dos décadas. Este modelo afirma que el contenido de materia en el Universo está dominado por la materia oscura. Adicionalmente incluye una componenten conocida como la constante cosmológica que explica la expansión acelerada del Universo. En este modelo la materia bariónica es una fracción minoritaria del contenido de materia energía del Universo. La repartición de estas tres componentes en términos de fracciones de la densidad total correponden 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, **las simulaciones computacionales son la mejor herramienta** para seguir la evolución temporal de la distribución de materia. Este gran avance en los métodos computacionales ha estado motivado por los avances en técnicas observacionales que permiten hacer mapas del Universo a grandes escalas a partir de mediciones de los espectros de millones de galaxias. Actualmente, estas campañas observacionales también se retroalimentan de los resultados de las simulaciones. Esto hace que finalmente las simulaciones computacionales sean una herramienta útil para los astrofísicos teóricos y los astrónomos observacionales. **Sin el trabajo conjunto de simuladores y observadores sería imposible inferir la estructura que tiene el Universo.**

Nuestro proyecto busca dar respuesta a la pregunta sobre la estructura del Universo realizando simulaciones para estudiar posibles efectos medibles y así mismo aplicar este conocimiento en la planeación de observaciones con instrumentos de siguiente generación.

## 7. Justificación

Las siguientes razones justifican la pertinencia de esta propuesta:

- 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 sobre la distribución de galaxias a gran escala para inferir valores de parámetros comológicos.
- 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:

- Desarrollar nuevo software para plataformas de cómputo de alto rendimiento necesario para el análisis de grandes cantidades de datos (Big Data).
  - 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.

## 8. Marco conceptual

El principal elemento conceptual de este proyecto es la **Cosmología vista a partir de la estructura del Universo a gran escala**. Los principales aspectos de esta área de conocimiento se pueden dividir en tres ramas: teoría, simulaciones y observaciones.

### 8.1. Teoría

Desde el punto de vista teórico hay dos tipos de observables que nos dan claves sobre los contenidos y características del Universo. El primero es la historia de expansión del Universo; el segundo es la evolución de la distribución de galaxias a gran escala. Ambos observables se pueden obtener a partir de mediciones de posiciones de millones de galaxias.

La **historia de expansión** del Universo, parametrizada 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 tres componentes: la densidad de materia bariónica ( $\Omega_b$ ), la densidad de materia oscura ( $\Omega_{dm}$ ) y la densidad de energía oscura ( $\Omega_{DE}$ ), la cual puede variar en el tiempo dependiendo del valor de la constante  $w$  en la ecuación de estado,  $\Omega_{DE}$  donde

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

asumiendo que el Universo es plano ( $\Omega_b + \Omega_{dm} + \Omega_{DE} = 1$ ) y que  $w$  es una constante. En esta ecuación tomamos a  $\Omega_{DE}$  de manera general para una sin asumir que se trata de una constante cosmológica,  $\Omega_\Lambda$  con  $w = -1$ .

Actualmente estos parámetros cosmológicos están acotados observacionalmente cerca a los siguientes valores  $\Omega_b = 0,05$ ,  $\Omega_{dm} = 0,25$ ,  $\Omega_{DE} = 0,70$  y  $w = -1$ . Pero hay mucho interés por medir con alta precisión  $\Omega_{DE}$  y  $w$ . La razón es que estas dos cantidades están directamente relacionadas con la expansión acelerada del Universo. Explicaciones de esta aceleración pueden corresponder a una simple constante cosmológica o pueden ser la evidencia de que Relatividad General no es la teoría correcta para la gravedad [13].

Por otro lado, el **crecimiento de estructura a gran escala** depende principalmente de dos cosas: las 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.

En este contexto la variable relevante 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 este crecimiento está descrito 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. Aunque incluso en el régimen no lineal el contraste de densidad también depende de esta función  $D(t)$ .

Lo interesante 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  $w$  [13].

En resumen, **la teoría predice que mediciones de la distribución de galaxias tienen información para, simultáneamente, poner a prueba la teoría de la Relatividad General y medir la composición del Universo.**

## 8.2. Simulaciones

La descripción analítica esbozada anteriormente nos acercar a varios fenómenos del crecimiento de estructura. Sin embargo, una descripción detallada solamente es posible a través de las simulaciones computacionales.

En el caso de simulaciones para la cosmología estándar  $\Lambda$  Cold Dark Matter ( $\Lambda$ CDM) se sigue un aproximación en la cual solamente se simula la componente oscura y no la luminosa, dado que la primera domina la dinámica del sistema y es suficiente para tener una primera aproximación sobre la distribución espacial de las galaxias, el observable más importante para nuestro proyecto.

En estas simulaciones se toma un volumen computacional de un volumen representativo del Universo. La distribución de materia oscura es 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, 11, 18].

Como en todo experimento numérico hay dos cantidades centrales para la descripción del sistema: las condiciones iniciales y las reglas para su evolución temporal. Las condiciones iniciales están definidas por 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 relacionadas con parámetros cosmológicos y el tipo de materia oscura que se considera. 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 [19].

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 (halos) en donde las galaxias deberian formarse y evolucionar.

En este punto es posible entonces pasar a una descripción de la distribución de materia en la simulación a partir de las posiciones velocidades y masas de estos **halos de materia oscura**. Estos objetos serán los centrales al momento de vincular las predicciones de los modelos con las observaciones. Estos halos sirven en las construcción de **catálogos ficticios** que se son comparables



con mapas de la distribución de galaxias en el Universo una vez se ha decidido sobre un mapeo entre halos de materia oscura y materia visible.

### 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) [20] y el Two Degree Field Galaxy Redshift Survey (2dFGRS) [5]. El objetivo principal de estas campañas observacionales fue 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  $\Omega_m$  [14] y el pico en la función de correlación correspondiente a la Oscilación Acústica de Bariones (OAB) [8]. 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 hacen a través de la cuantificación de la distribución de las posiciones de las galaxias en la dirección radial y perpendicular al observador [15], aunque los resultados actuales no tienen la precisión suficiente para distinguir entre el modelo estándar y teorías modificadas de la gravedad.

DESI es una colaboración internacional que tiene como objetivo medir el corrimiento al rojo de 25 millones de galaxias tomados de una lista de targets identificados de manera espectroscópica. Esto es 10 veces más espectros de galaxias de los que han sido tomados hasta la fecha. Estos espectros serán tomados con 5000 posicionadores automáticos cubriendo un área del cielo de 14000 grados cuadrados aproximadamente. Se observarán principalmente tres tipos de galaxias, galaxias luminosas rojas (LRG, por sus iniciales en inglés), galaxias de líneas de emisión (ELG) y cuásares (QSO) [4]. El survey se hará en el observatorio de Kitt Peak en Arizona (Estados Unidos) con el telescopio Mayall de 4 metros entre el 2018 y el 2023. El objetivo principal será medir la historia de expansión del Universo con una precisión sin precedentes usando este mapa tridimensional de galaxias.

**En este proyecto nos proponemos producir simulaciones del Universo a gran escala tal como será observado con DESI.**

## 9. Estado del arte

### 9.1. Pruebas observacionales 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) o Redshift Space Distortions (RSD).
3. El bosque Lyman- $\alpha$  de cuásares distantes.
4. Efecto de lente gravitacional débil.
5. Mediciones de distancias con supernovas.
6. Abundancia de cúmulos de galaxias.

Para misiones observacionales desde tierra los métodos más interesantes son los primeros tres. En el caso de misiones espaciales los seis métodos son considerados.

El más favorecido en ambos casos es 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 [3, 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 compuestas por cientos de científicos, dada la gran cantidad de las observaciones, reducción de datos y simulaciones que deben ser hechas para obtener los resultados.

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 [15]. 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 son las pruebas novedosas que se benefician de los grandes volúmenes que serán observados. Entre estos se encuentran

- El efecto Alcock-Paczinsky sobre la estructura a gran escala [17].
- 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  $\sim 5$  años es observar al menos un orden de magnitud más de galaxias en un rango de redshift  $0,7 < z < 2,0$  de las observadas hasta ahora, extendiendo el rango actual  $z < 0,7$ . Dentro de estas misiones se destacan:

- **Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI)**. Empezará a tomar datos en el 2018. Espera tomar espectros de cerca de +25 millones de galaxias utilizando el telescopio de 4 metros en el Kitt Peak Observatory en Estados Unidos [12].
- **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  $1000 - 10000 h^{-1} \text{Mpc}$  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](http://www.marcobaldi.it/web/CoDECS_summary.html)).

En todos estos casos es un objetivo de la comunidad tener más volúmenes simulados, con diferentes códigos y diferentes técnicas. Esto permite que los resultados computacionales sean robustos y con pocos sesgos por tener un número pequeño de volúmenes simulados. **En este proyecto nos proponemos utilizar simulaciones de grandes volúmenes del Universo para convertirlos en catálogos ficticios de galaxias que luego puedan ser procesados a través de una serie de programas que simulen las observaciones de DESI y estimar con qué precisión pueden inferirse los parámetros cosmológicos de los universos simulados.**

## 10. Objetivos

### 10.1. Objetivos generales

Simular catálogos de galaxias del Universo a gran escala que sigan las condiciones realistas de observabilidad por instrumentos astronómicos. Para ello nos proponemos.

1. Utilizar datos observacionales de la distribución de galaxias para encontrar relaciones sencillas entre la masa de halos de materia oscura y las propiedades observables de una galaxia.
2. Crear un catálogo ficticio de galaxias en escalas de  $3 \text{ Gpc}^3$  a partir de simulaciones de materia oscura del Universo a gran escala.
3. Escribir rutinas que simulen el proceso de observación de estas galaxias con la instrumentación de DESI.
4. Crear un catálogo ficticio de galaxias que incluyan los efectos observacionales de la instrumentación de DESI.

El software generado por nuestro proyecto estará a disponibilidad de la comunidad astronómica internacional a través de repositorios públicos.

### 10.2. Objetivos específicos

1. Adquirir acceso a las simulaciones cosmológicas de materia oscura disponibles dentro de la colaboración DESI.
2. Analizar las anteriores simulaciones para asignar luminosidades a los halos de materia oscura.
3. Encontrar los mejores parámetros que asignen luminosidad a materia oscura para reproducir las propiedades (función de correlación y distribución en redshift) de las galaxias que será observadas por DESI (LRG, ELG, QSO).
4. Construir catálogos ficticios de galaxias (LRG, ELG, QSO) a partir de las simulaciones y los parámetros descritos anteriormente.
5. Escribir/adaptar software que describa la cadencia del telescopio DESI sobre el área del cielo a ser observada.
6. Escribir/adaptar software que describe la asignación de fibras ópticas a las galaxias observables por DESI.
7. Escribir/adaptar software que describe la eficiencia de obtener una medición confiable de redshift una vez ha sido apuntado con una fibra óptica.
8. Escribir/adaptar software que simula el catálogo de galaxias ficticias que tiene en cuenta la probabilidad de medir un redshift.

9. Escribir/adaptar software que vincula todos los pasos anteriores para simular de manera completa el experimento DESI hasta llegar a la creación de un catálogo de galaxias que describe la estructura del Universo a gran escala.
10. Estudiar el impacto de la instrumentación de DESI en la estimación de parámetros cosmológicos a través de métodos de Oscilaciones Acústicas de Bariones y de Distorsiones en el Espacio de Redshift.

## 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.

### T1. Infraestructura computacional para procesar simulaciones cosmológicas en Uniandes.

- T1.1 [**TECN**] Compra, instalación y mantenimiento de 12TB 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 [**TECN**][**PROF**] Transferir datos y software de la colaboración DESI a las máquinas de Uniandes para hacer pruebas de todos los pasos siguientes antes de pasar a una implementación definitiva en los clusters computacionales de la colaboración DESI.

### T2. Analizar relación entre materia oscura y luminosidad para galaxias del tipo ELG, LRG y QSO

- T2.1 [**GRAD1**][**PROF**] Escribir software para la generación de catálogos ficticios de galaxias a partir de alguna relación analítica entre masa de halo de materia oscura y luminosidad.
- T2.2 [**GRAD1**][**PROF**] Escribir software que haga la comparación de los catálogos anteriores con datos observacionales.

**T3. Encontrar los mejores parámetros de modelos teóricos para generar catálogos ficticios de ELG, LRG y QSO.**

T3.1 [GRAD1][PROF] Explorar el espacio de parámetros

T3.2 [GRAD1][PROF] Escribir software que haga la comparación de los catálogos anteriores con datos observacionales.

**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`<sup>1</sup> para generar catálogos ficticios 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.

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.

**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.

**T7. Probabilidad de medir un redshift**

T7.1 [PROF] Escribir software que calcule la probabilidad de medir con éxito un redshift con éxito dependiendo del tipo de galaxia, su luminosidad, las condiciones del cielo y el instrumento.

**T8. Simulación de un catálogo que incluye la probabilidad de medir un redshift.**

T8.1 [PROF] Escribir software que calcule un catálogo de galaxias generado a partir de una simulación de N-cuerpos teniendo en cuenta las diferentes probabilidades de medir un redshift.

---

<sup>1</sup>[https://github.com/mockFactory/make\\_survey](https://github.com/mockFactory/make_survey)

**T9. Integrar el software de todos los pasos anteriores**

- T9.1 [GRAD2][PROF] Integrar en la base de código de DESI el software para preparar catálogos ficticios de galaxias a partir de simulaciones de N-cuerpos.
- T9.2 [GRAD2][PROF] Integrar en la base de código de DESI el software para definir las secuencias de observación del experimento.
- T9.3 [GRAD2][PROF] Integrar en la base de código de DESI el software para definir la asignación de fibras ópticas.
- T9.4 [GRAD2][PROF] Integrar el código completo de simulación end-to-end de DESI.

**T10. Producir catálogos de galaxias con todos los efectos instrumentales de DESI**

- T10.1 [GRAD2][PROF] Producir simulaciones completas de simulación end-to-end de DESI. Desde las observaciones hasta la estimación de redshifts de galaxias observadas.

**T11. Efectos instrumentales sobre mediciones OAB**

- T11.1 [GRAD2] Cuantificar el efecto instrumental sobre mediciones de Oscilaciones Acústicas de Bariones usando catálogos de galaxias simulados.

**T12. Efectos instrumentales sobre mediciones DER**

- T12.1 [GRAD2] Cuantificar el efecto instrumental sobre mediciones de Distorsiones en el Espacio de Redshift catálogos de galaxias simulados.

**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 paralelo en la realización de catálogos de galaxias que representan la 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.
- 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 en términos de productos

1. Avances de una tesis doctoral en temas relacionados con la relación entre halos de materia oscura y propiedades observables de una galaxia.
2. Avances de una tesis doctoral en temas relacionados con estimación de parámetros cosmológicos a partir de datos observacionales.
3. Presentación de resultados en al menos dos eventos internacionales.
4. Presentación de resultados en al menos dos eventos nacionales.
5. Publicación de al menos dos artículos en revistas internacionales indexadas.
6. Producción de al menos un producto de software para la simulación de instrumentos de espectroscopía masiva.
7. Creación de una página web formato weblog dedicada a mostrar los avances del proyecto.
8. Al menos dos charlas públicas 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 segundo semestre 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. Los siguientes artículos en colaboración con científicos de DESI han sido presentados en conferencias internacionales y en los encuentros de la American Astronomical Society.

- *The Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI): Tiling and Fiber Assignment* Cahn, Robert N.; Bailey, Stephen J.; Dawson, Kyle S.; **Forero Romero, Jaime**; Schlegel, David J.; White, Martin; DESI Collaboration, American Astronomical Society, AAS Meeting #225, #336.10, (2015)
- *The Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI): Data Systems* Bailey, Stephen; Bolton, Adam S.; Cahn, Robert N.; Dawson, Kyle; **Forero Romero, Jaime**; Guy, Julien; Kisner,



Theodore; Moustakas, John; Nugent, Peter E.; Schlegel, David J.; Stark, Casey; Weaver, Benjamin; DESI Collaboration , American Astronomical Society, AAS Meeting #225, #336.09, (2015)

- *Target allocation yields for massively multiplexed spectroscopic surveys with fibers* Saunders, Will; Smedley, Scott; Gillingham, Peter; **Forero-Romero, Jaime E.**; Jouvel, Stephanie; Nord, Brian, Proceedings of the SPIE, Volume 9150, id. 915023 10 pp. (2014).

## 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 unab cl` (UNAB, Chile)

## 16. Cronograma

El cronograma está estructurado en 6 semestres (SEM) a partir de las tareas y responsables especificadas en la Sección 11.

- SEM-1** T1.1 [**TECN**] Compra, instalación y mantenimiento de 12TB 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 [**TECN**][**PROF**] Transferir datos y software de la colaboración DESI a las máquinas de Uniandes para hacer pruebas de todos los pasos siguientes antes de pasar a una implementación definitiva en los clusters computacionales de la colaboración DESI.
- T2.1 [**GRAD1**][**PROF**] Escribir software para la generación de catálogos ficticios de galaxias a partir de alguna relación analítica entre masa de halo de materia oscura y luminosidad.
- T2.2 [**GRAD1**][**PROF**] Escribir software que haga la comparación de los catálogos anteriores con datos observacionales.
- SEM 2** T3.1 [**GRAD1**][**PROF**] Explorar el espacio de parámetros
- T3.2 [**GRAD1**][**PROF**] Escribir software que haga la comparación de los catálogos anteriores con datos observacionales.
- 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`<sup>2</sup> para generar catálogos ficticios de galaxias a partir de catálogos de halos materia oscura.

<sup>2</sup>[https://github.com/mockFactory/make\\_survey](https://github.com/mockFactory/make_survey)

- T5.1 **[PROF]** Escribir software que simule la secuencia de observación de DESI sobre un catálogo de galaxias generado aleatoriamente.
- 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.
- SEM-3** 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.
- T7.1 **[PROF]** Escribir software que calcule la probabilidad de medir con éxito un redshift con éxito dependiendo del tipo de galaxia, su luminosidad, las condiciones del cielo y el instrumento.
- T8.1 **[PROF]** Escribir software que calcule un catálogo de galaxias generado a partir de una simulación de N-cuerpos teniendo en cuenta las diferentes probabilidades de medir un redshift.
- SEM-4** T9.1 **[GRAD2][PROF]** Integrar en la base de código de DESI el software para preparar catálogos ficticios de galaxias a partir de simulaciones de N-cuerpos.
- T9.2 **[GRAD2][PROF]** Integrar en la base de código de DESI el software para definir las secuencias de observación del experimento.
- T9.3 **[GRAD2][PROF]** Integrar en la base de código de DESI el software para definir la asignación de fibras ópticas.
- T9.4 **[GRAD2][PROF]** Integrar el código completo de simulación end-to-end de DESI.
- T10.1 **[GRAD2][PROF]** Producir simulaciones completas de simulación end-to-end de DESI. Desde las observaciones hasta la estimación de redshifts de galaxias observadas.
- SEM-5** T11.1 **[GRAD2]** Cuantificar el efecto instrumental sobre mediciones de Oscilaciones Acústicas de Bariones usando catálogos de galaxias simulados.
- SEM-6** T12.1 **[GRAD2]** Cuantificar el efecto instrumental sobre mediciones de Distorsiones en el Espacio de Redshift catálogos de galaxias simulados.

## 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. Nuzar, 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] 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.
- [4] R. N. Cahn, S. J. Bailey, K. S. Dawson, J. Forero Romero, D. J. Schlegel, M. White, and DESI. The Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI): Tiling and Fiber Assignment. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, volume 225 of *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, page #336.10, January 2015.
- [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. Krumpe, 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. Muschiello, 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  $\Lambda$ 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] A. Klypin, A. V. Kravtsov, O. Valenzuela, and F. Prada. Where Are the Missing Galactic Satellites? *ApJ*, 522:82–92, September 1999.
- [12] 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.
- [13] M. J. Mortonson, D. H. Weinberg, and M. White. Dark Energy: A Short Review. *ArXiv e-prints*, December 2014.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] R. Scoccimarro. Redshift-space distortions, pairwise velocities, and nonlinearities. *PRD*, 70(8):083007, October 2004.
- [17] Y.-S. Song, T. Okumura, and A. Taruya. Broadband Alcock-Paczynski test exploiting redshift distortions. *ArXiv e-prints*, September 2013.
- [18] 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.
- [19] M. White. The Zel’dovich approximation. *MNRAS*, 439:3630–3640, April 2014.
- [20] 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
Personal científico	0	99.297.925	99.297.925
Eventos Académicos	12.000.000	0	0
Equipos	102.000.000	82.000.000	184.000.000
Software	0	0	0
Materiales e insumos	0	0	0
Salidas de Campo	0	0	0
Material Bibliográfico	0	0	0
Publicaciones y patentes	18.000.000	0	18,000,000
Servicios Técnicos	0	0	0
Viajes	58,000,000	0	58.000.000
Gastos de Operación 7 %	12.460.000	0	12.460.000
Total financiado por Colciencias	190,460,000	0	0
Seguimiento y Evaluación 3 %	5.713.800	0	5.713.800
Valor total	<b>196.173.800</b>	<b>181.297.925</b>	<b>377.471.725</b>

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

Rubro	Descripción	Año 1	Año 2	Año 3
Viajes	Visita a Durham, Estudiante #1	8.000.000	0	0
Viajes	Visita a Durham, Estudiante #1	0	8.000.000	
Viajes	Visita a Durham, Estudiante #2	0	8.000.000	0
Viajes	Visita a Durham, Estudiante #2	0		8.000.000
Viajes	Visita a Berkeley, Investigador Principal	0		8.000.000
Viajes	Presentación Internacional	6.000.000		0
Viajes	Presentación Internacional	0	6.000.000	0
Viajes	Presentación Internacional	0	0	6.000.000
Publicaciones	Astrophysical Journal	6.000.000	6.000.000	6.000.000
Equipos	Almacenamiento de 5TB con backup	20.000.000	0	0
Equipos	Compra de 2 Blades, 24 procesadores y 512GB de RAM	41.000.000	41.000.000	0
<b>Total por año</b>		61.000.000	69.000.000	28.000.000
<b>Total</b>		<b>158.000.000</b>		

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
Personal Científico	Sueldo Profesor	31.809.945	33.082.343	34.405.637	Universidad de los Andes
Equipos	Cluster para cómputo de alto rendimiento (10% de la inversión total)	82.000.000	0	0	Departamento de Servicios de Información y Tecnología
<b>Total por año</b>		113.809.945	33.082.343	34.405.637	
<b>Total aportado</b>		<b>181.297.925</b>			

Cuadro 3: Desglose del presupuesto de los items financiados por la Universidad de los Andes El sueldo del profesor corresponde a 10 horas/semana, con aumentos de 4 % anuales. Todos los rubros en COP.