



Comparación de Métodos Para la Determinación de la Distancia a la Gran Nube de Magallanes

Juan José Sánchez Medina 

Metodología de la Investigación, Colegio Andino de Tunja

Tutor: J. Alejandro Puerto M.

27 de noviembre 2023

Notas del autor:

Juan José Sánchez Medina

Investigación presentada como requisito para obtener el título de Bachiller en el Colegio Andino de Tunja, 2023.

Directores: Andrea Sánchez Vega, Xiomara Maldonado Sora

Resumen

Esta investigación busca comparar distintos métodos de cálculo de distancias con el fin de determinar la distancia a la Gran Nube de Magallanes LMC . Se establece esta distancia (d_{LMC}) usando: paralaje estelar, estrellas variables de tipo RR Lyrae y cefeidas clásicas, corrimiento a rojo y mecánica celeste; de los cuales se determina el error sistemático y error estándar de cada uno. Finalmente, tras el análisis de cada método, se obtiene un resultado de $d_{LMC} = 50.4802 \pm 0.0638_{std} \pm 0.0638_{sys}$ alejado por +0.5102 Kpc del valor aceptado actualmente de $d_{LMC} = 49.97$ Kpc (Pietrzyński, 2014)., este valor se obtuvo combinando las distancias halladas mediante los métodos de variables RR Lyrae, variables cefeidas clásicas y la supernova SN1987a.

Abstract

This research paper looks forward to compare different methods to calculate the distance to the Large Magellanic Cloud LMC . The distance d_{LMC} is calculated using: stellar parallax, variable stars: RR Lyrae and Classical Cepheids, redshift and celestial mechanics; from which the systematic error and standard error is determined. Finally, after the analysis of each method, the distance is obtained being set at $d_{LMC} = 50.4802 \pm 0.0638_{std} \pm 0.0638_{sys}$ only apart by +0.5102 from the currently most accepted value of $d_{LMC} = 49.97$ Kpc (Pietrzyński, 2014)., in this paper, the value of d_{LMC} was obtained by combining the distances determined from the RR Lyrae and classical cepheids variable stars and the supernova SN1987a.

Palabras Clave: LMC, Gran Nube de Magallanes, Supernova, Paralaje, Cefeidas, RR Lyrae, Galaxias Satélites, Vía Láctea, Binarias Eclipsantes, Hubble-Lemaitre, Relación Periodo Luminosidad, Distancia, SN1987a, OGLE, JWST, GAIA, Grupo Local.

Keywords: LMC, Large Magellanic Cloud, Supernova, Parallax, Cepheids, RR Lyrae, Satellite Galaxies, Milky Way, Eclipsing Binaries, Hubble-Lemaitre, Period Luminosity Relation, Distance, SN1987a, JWST, OGLE, GAIA, Local Group.

Índice

Lista de Símbolos	7
Abreviaciones	9
Introducción	11
Planteamiento del Problema	13
Descripción del Problema	13
Pregunta Problema	17
Justificación	17
Objetivos	19
Objetivo General	19
Objetivos Específicos	19
Marco Teórico	19
Referente Conceptual	19
Grupo Local	19
Vía Láctea	20
Gran Nube de Magallanes	20
Paralaje	22
Estrellas Variables Intrínsecas	22
Velocidad de Recesión	23
Binarias Eclipsantes	23
OGLE	25
Telescopio Espacial James Webb	25
Unidades de Distancia en el Universo	26
Formato de números	27

Metodología	27
Tipo y Ámbito de Estudio	27
Fuentes de Información	27
Datos Analizados	27
Fuentes de Información	28
Diseño Metodológico	28
Variables de Análisis	28
Programas Empleados	29
Procedimiento	29
Paralaje	29
Variables de tipo RR Lyrae	31
Variables Cefeidas Clásicas	34
Corrimiento al rojo	37
Mecánica Celeste	46
Supernova SN1987a	49
Resultados	52
Discusión	53
Conclusiones	54
Disponibilidad de Datos	56
Disponibilidad del Código	56
Referencias	57
Apéndices	68

Índice de figuras

1.	Representación gráfica del Grupo Local.	14
2.	Distancias a la LMC a lo largo del tiempo.	18
3.	Brazos espirales de LMC.	21
4.	Mapa de las EBs capturadas por OGLE III.	24
5.	Mapa de las RR Lyrae capturadas por OGLE III.	32
6.	Mapa de las cefeidas clásicas capturadas por OGLE III.	34
7.	Mapa muestras LMC tomadas por el JWST.	38
8.	Resultados corrimiento al rojo JWST-1.	40
9.	Resultados corrimiento al rojo JWST-2.	41
10.	Resultados corrimiento al rojo JWST-3.	42
11.	Resultados corrimiento al rojo JWST-4.	43
12.	Resultados corrimiento al rojo JWST-5.	44
13.	Análisis geométrico posición de LMC respecto a la Tierra.	48
14.	Análisis geométrico de SN1987a respecto a la Tierra.	49
15.	Curva de luz en la banda UV de la explosión de SN1987a.	50

Índice de tablas

1.	Escalera cósmica estelar.	15
2.	Unidades de Distancia Cósmicas.	26
3.	Análisis de Datos: Paralaje	30
4.	Datos recopilados de GAIA.	30
5.	Distancia a LMC mediante paralaje.	31
6.	Datos de variables RR Lyrae recopilados de OGLE III.	33
7.	Distancia mediante estrellas RR Lyrae.	33
8.	Datos de Cefeidas recopilados de OGLE III.	36
9.	Distancia mediante estrellas Cefeidas Clásicas.	37
10.	Regiones seleccionadas en LMC usando el JWST.	39
11.	Resultado corrimiento al rojo de las 5 regiones seleccionadas.	45
12.	Distancia usando el z de las 5 regiones seleccionadas.	46
13.	Distancia a LMC usando corrimiento al rojo.	46
14.	Coordenadas CG y LMC.	47
15.	Distancia a LMC usando Mecánica Celeste.	48
16.	Distancia a LMC mediante la SN1987a.	51
17.	Métodos usados para determinar la distancia a LMC.	52
18.	Resultado Distancia a LMC	53

Lista de Símbolos

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad	Definición
H_0	Constante de Hubble	$\frac{Km}{s}$ Mpc	Tasa de expansión del Universo
M_\odot	Masa Solar	Kg	Masa del Sol
z	Redshift	N/A	Corrimiento al rojo
M_V	Magnitud Absoluta	mag	Brillo de un cuerpo a 10 pc
m_V	Magnitud Visual	mag	Brillo aparente de un cuerpo
M_I	Magnitud Absoluta	mag	En la banda Infrarroja
m_I	Magnitud Visual	mag	En la banda Infrarroja
$A_{V/I}$	Extinción Interestelar	mag	Corrección debido a gas o polvo
M_{bol}	Magnitud Bolométrica	mag	Brillo absoluto bolométrico
m_{bol}	Magnitud Bolométrica	mag	Brillo aparente bolométrico
T	Temperatura	K	DF
t	Tiempo	s	DF
v	Velocidad	$\frac{m}{s}$	$\frac{dr}{dt}$
P	Periodo	s	Tiempo para completar una oscilación
G	Constante Gravitacional	$\frac{N \cdot m^2}{Kg^2}$	Constante
c	Velocidad de la Luz	$\frac{m}{s}$	Constante

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad	Definición
π	Ángulo de Paralaje	$\frac{1}{3600}$ °	Desviación Angular de la Posición
α	Asención Recta	DMS / Deg	Componente de Coordenadas celestes
δ	Declinación	DMS / Deg	Componente de Coordenadas celestes
σ	Desviación Estándar	N/A	$\frac{dv}{dt}$
λ_{obs}	Longitud de Onda	m	Longitud de Onda del Observador
λ_{rest}	Longitud de Onda	m	Longitud de Onda emitida
μ	Módulo de distancia	mag	$m - M$
v	Velocidad de Recesión	$\frac{m}{s}$	Velocidad respecto a z
ϕ	Diámetro angular	deg	Diámetro aparente de un cuerpo
θ	Ángulo	deg	Ángulo entre dos puntos

Subíndices

Símbolo	Término
\odot	Sol
\oplus	Tierra
LMC	Gran Nube de Magallanes
MW	Del Inglés, Vía Láctea
I	Infrarrojo
V	Visual
*	Estrella
W	Wesenheit

Tabla de Constantes

Símbolo	Término	Valor
G	Constante Gravitacional	$6.6738 \times 10^{-11} \frac{Nm^2}{Kg^2}$
$1yr$	Año Sideral	365.25 Días
c	Velocidad de la Luz	$2.9979 \times 10^8 \frac{m}{s}$
M_{\odot}	Masa del Sol	$1.989 \times 10^{30} Kg$
H_0	Parámetro de Hubble	$\frac{\frac{Km}{s}}{Mpc}$
$1pc$	Parsec	$3.0856 \times 10^{16} m$

Abreviaciones

ESA Del inglés, European Space Agency.

NASA Del inglés, National Aeronautics and Space Administration.

HST Del inglés, Hubble Space Telescope.

JWST Del inglés, James Webb Space Telescope.

AU Del inglés, Astronomical Unit.

SN Súper Nova.

SNR Del inglés, Super Nova Remanant.

DF Dimensión Fundamental

LMC Del inglés, Large Magallenic Cloud.

SMC Del inglés, Small Magallenic Cloud.

IAU Del inglés, International Astronomical Union.

LG Del inglés, Local Group.

SBm Clasificación morfológica de galaxias por Edwin Hubble; SBm se establece para galaxias espirales con la presencia de una barra nuclear de aspecto irregular.

NGC Del inglés, New General Catalogue.

M Del catálogo de objetos celestes Messier.

AGN Del inglés, Active Galactic Nucleus.

MS Del inglés, Main Sequence.

OGLE Del inglés, Optical Gravitational Lensing Experiment.

GAIA Misión espacial dirigida por la ESA.

VLT Del inglés, Very Large Telescope.

ELT Del inglés, Extremely Large Telescope.

SMBH Del inglés, Super Massive Black Hole.

mas Del inglés, milliarcsecond.

MW Del inglés, Milky Way.

MAST Del inglés, Mikulski Archive for Space Telescopes.

IUE Del inglés, International Ultraviolet Explorer.

FITS Del inglés, Flexible Image Transport System.

mag Del inglés, magnitude, medida de brillo.

ECL Del inglés, Eclipsing.

CEP Del inglés, Cepheids.

Introducción

El desarrollo de la noción de nuestra ubicación en universo y el mapeo del mismo desde el sistema local hasta nuestra ubicación en grupos de galaxias han sido un tema recurrente de investigación en las últimas décadas por la astrofísica y cosmología. Este campo de investigación nos ha permitido establecer relaciones y patrones en cómo se organiza nuestro universo, calibrar mediciones y parámetros estelares, reconocer la distribución de materia del mismo; así como, crear nuevos modelos que permiten apoyar la precisión en cálculos cosmológicos como lo es el de Hubble-Lemaitre, gracias a que podemos observar patrones en la dilatación y expansión del universo; así como rastrear cómo lucía el universo en su inicio comparando diferentes mediciones e identificando tendencias (Brescher, 2023; Freedman et al., 2019).

La medición de distancias en el espacio ha sido desde el inicio de la astronomía un tema de alto interés desde el cual se han desarrollado por más de 2000 años métodos geométricos, ópticos, físicos o cosmológicos; métodos que se diferencian por sus niveles de precisión y error según la distancia de la distancia y escala en cuestión (Thabet, 2013).

Cuando se habla del grupo local, encontramos que la Vía Láctea se encuentra acompañada por más de 60 galaxias satélites (Bovill & Ricotti, 2011), donde se destacan la Pequeña Nube de Magallanes (SMC) y la Gran Nube de Magallanes (LMC). Esta última, es una galaxia enana de tipo SBm¹, ubicada en la constelación de Dorado (Dor) y Mensa (Men), con un tamaño angular de aproximadamente $322.8' \times 274.7'$ y una magnitud aparente visual $m_v = 0,13$ (NED, 2023; SIMBAD, 2023).

¹ Galaxia de tipo espiral barrada.

Por otra parte, en el futuro lejano *LMC* se incorporará a la Vía Láctea (Cautun et al., 2018); este futuro suceso gana importancia puesto que nos permitirá comprender las interacciones entre galaxias que ocurren en el universo, así como las posibles víctimas y el desenlace de esta colisión.

Las Nubes de Magallanes (NM) han sido de gran ayuda como zona de investigación debido a su relativa cercanía y las características de la misma, lo cual ha permitido desarrollar múltiples investigaciones. En el caso de la Gran Nube de Magallanes encontramos zonas altamente activas en la formación de estrellas, contando con un alto número de estrellas jóvenes, masivas y calientes; la Nebulosa de la Tarántula (NGC²2070), la Nebulosa del Fríjol (NGC1763), NGC1760, NGC1773 o NGC1769; se destacan por ser las nebulosas de emisión más visibles de LMC (Zotti et al., 2021). Entre otros objetos con alto valor científico en la LMC contamos con la presencia de más de 3050 cúmulos estelares, más de 24000 estrellas variables del tipo RR Lyrae, más de 3300 Cefeidas clásicas y 52 remanentes de supernovas (SNR³) (P. Ingrid, 2011).

La Gran Nube de Magallanes *LMC* es una región con un alto interés por parte de la comunidad científica, la cual es usada como calibración de múltiples procedimientos y cálculos, que dependen directamente de la distancia a esta (Freedman et al., 2019). Por este motivo, desde décadas atrás se han desarrollado y perfeccionando nuevos métodos que permitan medir la distancia a esta galaxia satélite; cada vez haciendo uso de nuevas tecnologías que estén disponibles como lo son el Telescopio Espacial Hubble (HST), el Telescopio Espacial James Webb (JWST), la sonda espacial (GAIA) y observatorios terrestres como el Observatorio Europeo Austral (ESO).

² Del inglés, New General Catalogue.

³ Del Inglés, Super Nova Remnant.

En esta investigación usa la comparación de seis métodos para la medición de distancias con el fin de encontrar un valor con una mayor precisión. Los métodos usados para determinar la distancia son: paralaje estelar; estrellas variables, RR Lyrae y Cefeidas; binarias eclipsantes; mecánica celeste; corrimiento al rojo y el uso de la supernova SN1987a.

Planteamiento del Problema

Descripción del Problema

Desde siglos atrás filósofos, matemáticos y científicos como Johanes Kepler e Isaac Newton establecieron las bases de la mecánica celeste introduciendo el concepto de fuerzas a distancia y explicando así el movimiento de los planetas y las fuerzas que intervienen en el proceso; las cuales dependen directamente de la distancia (Newton, 1687). Esta distancia nos permite convertir las propiedades observables de los planetas, estrellas, galaxias, agujeros negros, novas o supernovas en cantidades físicas (Blakeslee et al., 2021).

El sistema solar, ubicado en el brazo de Orión (Croswell, 2021), se encuentra aproximadamente a 8,1 Kpc⁴ de distancia del centro galáctico (Abuter et al., 2019). Asimismo, la vía láctea se encuentra en el denominado sector denominado *Grupo Local*, determinado por una región esférica de aproximadamente 3 Mpc⁵ de diámetro donde se encuentran más de 35 galaxias; esta relativa cercanía a las galaxias pertenecientes al Grupo Local nos permite resolver estrellas individuales para posteriormente realizar estudios fotométricos los cuales serán relevantes en la investigación presente (Bergh, 1999; P. Ingrid, 2011). Como se puede observar en la figura 1, la cercanía a las Nubes de Magallanes es significativa y brinda un primer vistazo del grupo local en el cual se encuentra la Vía Láctea, por ende, el Sistema Solar.

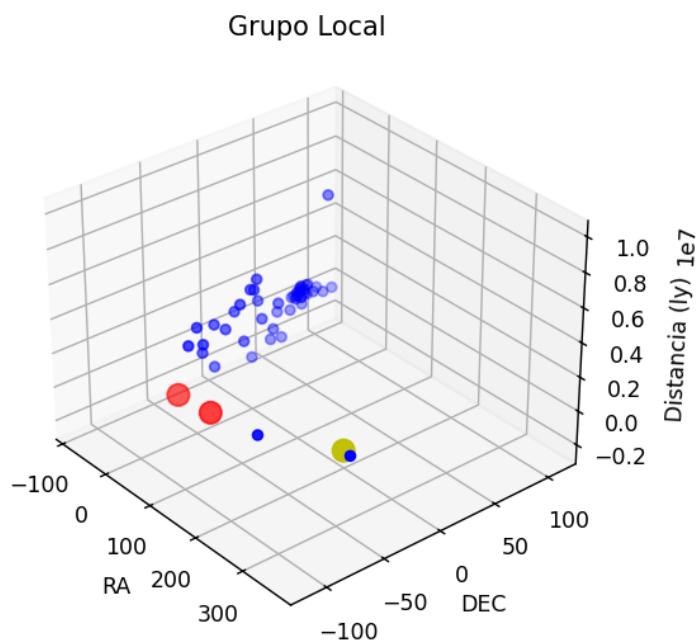
⁴ Kiloparsec, 1×10^3 pc.

⁵ Megaparsec, 1×10^6 pc.

Adicionalmente, la Gran Nube de Magallanes y la Pequeña nube de Magallanes son la cuarta y sexta galaxias más grandes en el grupo local, respectivamente; teniendo en cuenta su diámetro real⁶ (SIMBAD, 2023).

Figura 1

Representación gráfica del Grupo Local.



Nota. La figura 1 representa las galaxias del Grupo Local (LG) resaltando de rojo a la Gran y Pequeña Nube de Magallanes y de amarillo el centro galáctico. Considerando las escalas de la figura se puede aproximar que la tierra también se encuentra en el punto amarillo. Un script de Python fue usado para la elaboración de esta figura⁷.

La Gran Nube de Magallanes es la galaxia satélite más grande que posee la Vía Láctea, se estima que tiene una masa de aproximadamente $1.38 \times 10^{11} M_{\odot}$ (Erkal et al.,

⁶ Diámetro haciendo referencia a la dimensión de longitud.

⁷ Ver apéndice A.

2019),, aproximadamente $\frac{1}{9}$ la masa de la Vía Láctea. Además, como fue mencionado anteriormente, gracias a la investigación de Cautun et al. (2018) se estima que en aproximadamente en $2.4^{+1.2}_{-0.8}$ Gyrs LMC colisionará con la Vía Láctea, produciendo así, empujones gravitacionales a sistemas de estrellas junto a una mayor actividad en el núcleo galáctico (AGN⁸). La relevancia de esta colisión es que tendrá lugar mucho antes que la colisión de la galaxia de Andrómeda (M⁹31) y sus galaxias satélites (M32 y M110).

Actualmente existen múltiples métodos para la determinación de distancias en el espacio; cada uno se usa de acuerdo a la escala de la investigación, en el sentido de la distancia y objeto que se esté estudiando; esto se denomina la escalera cósmica de distancias, según Reiche (2022) esto se puede representar según la tabla 1.

Tabla 1

Escalera cósmica estelar.

Método	Distancia Efectiva	Objetos
Radar	10^{-4} ly	Sistema Solar
Paralaje	10^2 ly	Estrellas Cercanas
Ajuste de MS ¹⁰	10^5 ly	Vía Láctea
Cefeidas	10^7 ly	Galaxias Cercanas
Tully-Fisher	10^{10} ly	Cúmulos de Galaxias
Ley de Hubble-Lemaitre	$>10^{10}$ ly	Corrimiento al rojo $z \geq 10$

⁸ Del inglés, Active Galactic Nucleus

⁹ Hace referencia al identificador que recibe el catálogo de Messier: M-NN

¹⁰ Del Inglés, Main Sequence

Sin embargo, estos métodos pueden combinarse para lograr comparar los errores de cada uno o incluso poder combinarlos para obtener una medición aún más precisa; tal como lo demostró Clementini et al. (2003) cuando comparó los errores de 25 métodos de determinación de distancias distintos.

Paralelamente, con el desarrollo de nuevas tecnologías y mejores herramientas cada vez mediciones como esta. Telescopios y observatorios espaciales como el JWST, enfocado en el espectro infrarrojo; GAIA¹¹, observatorio de la ESA enfocado en la astrometría, espectrometría y fotometría de la bóveda celeste; Euclid, el cual se encargará principalmente de observar el espectro visible, espectrografía del infrarrojo cercano y fotometría; Chandra, el observatorio de rayos x de la NASA¹²; junto a grandes observatorios terrestres como el VLT¹³, el Gran Telescopio Canarias o los futuros proyectos como el ELT¹⁴; nos permiten resolver objetos a una resolución sin precedentes gracias en parte a nuevas tecnologías como lo son las ópticas adaptativas; de esta manera, podemos ver cual es el panorama de la astronomía en el futuro, donde, los procesos, investigaciones y proyectos actuales evolucionan con ella y nos brinda nuevas herramientas para seguir investigando (Gardner et al., 2006; Racca et al., 2016; Schöller, 2007; Vernin et al., 2011; Weisskopf et al., 2002).

Debido a la importancia que representa para la astronomía y cosmología el valor de la distancia a la Gran Nube de Magallanes, esta investigación busca integrar múltiples métodos para la determinación de distancias en el espacio para obtener un valor preciso a esta galaxia satélite.

¹¹ Misión espacial dirigida por la ESA.

¹² Del Inglés, National Aeronautics and Space Administration

¹³ Del Inglés, Very Large Telescope.

¹⁴ Del Inglés, Extremely Large Telescope

Pregunta Problema

¿Cómo se pueden combinar y complementar diferentes métodos para obtener una medición más precisa de la distancia a la Gran Nube de Magallanes?

Justificación

El universo es un laboratorio para los astrónomos el cual siempre ha asombrado a la humanidad, y se encuentra en constante cambio y evolución. La astronomía nació con las civilizaciones egipcias y mesopotámicas con la necesidad de comprender y prever ciertos fenómenos que tienen lugar en la tierra; del cual, más adelante surgirían calendarios que serían fundamentales en la evolución de la propia humanidad como civilización debido al desarrollo de la agricultura; además, pronto se analizarían fenómenos astronómicos como eclipses, estaciones, fases lunares o la construcción de relojes solares (María M., 2010). Estos sucesos dieron inicio a la astronomía como una ciencia que pronto sólo evolucionaría.

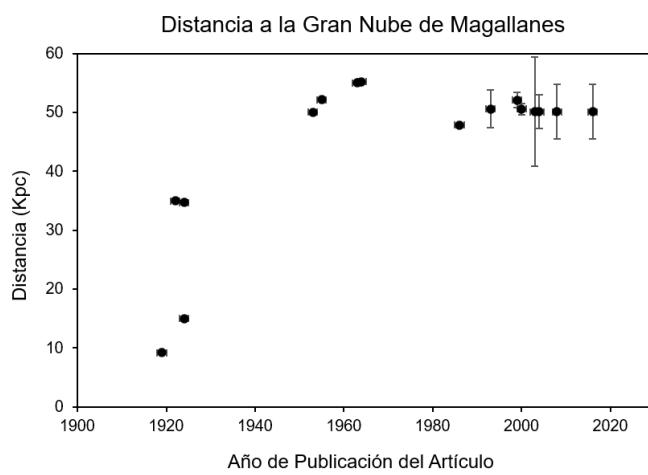
La Galaxia de la Vía Láctea, el hogar del sistema solar, es una galaxia de tipo espiral, en la cual nos encontramos a aproximadamente 8,1 Kpc del centro galáctico (Abuter et al., 2019; Xu et al., 2023). Esta cuenta con 11 galaxias satélites clásicas (Sawala et al., 2023), de las cuales nos centraremos en la Gran Nube de Magallanes (LMC). La LMC cuenta con registros hace más de 1000 años, la cual recibe su nombre gracias a la circunnavegación de la tierra en 1519-1522 de la expedición al mando de Fernando Magallanes; esta es una galaxia espiral satélite de la Vía Láctea que se ha estudiado desde entonces (P. Ingrid, 2011). La LMC es una región de estudio que junto a la SMC han permitido obtener descubrimientos en relación a la formación de estrellas, relaciones de índice de color, calibración de la constante de Hubble o la famosa relación de periodo-luminosidad (P-L) (ESO, 2019; Freedman et al., 2012; Leavitt & Pickering, 1912).

Las medición de distancias en el espacio toma relevancia desde los primeros modelos que se plantearon del sistema solar. Tiempo después, físicos como Isaac Newton o astrónomos como Johannes Kepler relacionaron la distancia a sus teorías y leyes; en el caso de Kepler, el cual desarrolló todo su trabajo usando los aportes que realizó Nicolás Copérnico previamente acerca de la distancia a los planetas mediante métodos geométricos. (Nicolaus, 1965; Russell, 1964).

En el caso de la Gran Nube de Magallanes, el interés por determinar la distancia a esta se ha presentado desde su descubrimiento y materializado desde el siglo pasado. La figura 2 muestra la distancia determinada por las investigaciones de Alves (2004a, 2004b, 2005), Chiosi y Pigatto (1986), Kopal (2013), Kovacs (2000), McCall (1993), Menzel (1922), Panagia (1999a), Schaefer (2007), Shapley (1924, 1953), Shapley y Nail (1955), Wilson (1924) y Wilson (1918) en diferentes épocas.

Figura 2

Distancias a la LMC a lo largo del tiempo.



Nota. La figura 2 representa las diferentes distancias a la LMC según el presente recopilado de investigaciones. Las primeras investigaciones no contaban con la estimación del error.

Como se evidencia en la figura 2 durante los anteriores 100 años se han realizados trabajos con el fin de determinar esta distancia. Asimismo, se evidencia que recientemente, las desviaciones en la medida de la distancia a la LMC se ha reducido considerablemente. Por los motivos anteriormente planteados, esta investigación hará uso de siete métodos diferentes con el fin de obtener un promedio con estos y llegar a un resultado con un grado de precisión notable a la LMC.

Objetivos

Objetivo General

Comparar los diferentes métodos de determinación de distancias a la Gran Nube de Magallanes.

Objetivos Específicos

Establecer los diferentes errores de cada uno de los métodos usados.

Determinar la distancia a LMC mediante cada método.

Calcular la distancia a LMC usando los métodos más fiables.

Marco Teórico

Referente Conceptual

Grupo Local

El grupo local es una región con límites imaginarios alrededor de la Vía Láctea, la cual tiene un diámetro de 3 Mpc y reúne alrededor de 60 galaxias; incluyendo tanto galaxias satélites como galaxias clásicas, como lo puede ser M31¹⁵ o M33¹⁶ (Bovill & Ricotti, 2011; NED, 2023).

¹⁵ Galaxia de Andrómeda en el catálogo de Messier.

¹⁶ Galaxia del Triángulo en el catálogo de Messier.

Vía Láctea

La Vía Láctea es la galaxia de tipo SBc (Gerhard, 2002), la cual alberga al sistema solar, por ende a la Tierra; la cual se ubica en el brazo local o brazo de Orión. Es la segunda galaxia más masiva del grupo local, después de M31. En su núcleo encontramos un SMBH¹⁷, del cual gracias a Abuter et al. (2019) nos encontramos a aproximadamente 8.1 Kpc de este centro galáctico; esta ubicación y distancia al centro galáctico toma relevancia a la hora de determinar distancias a otras galaxias cercanas mediante métodos geométricos, así como en el uso de coordenadas galácticas.

Gran Nube de Magallanes

La Gran Nube de Magallanes (LMC), es una galaxia satélite a la Vía Láctea (MW¹⁸) que se extiende por más de 7° en el hemisferio sur celeste. Su gran extensión fue la responsable de su descubrimiento, su nombre actual se lo da la expedición liderada por Fernando Magallanes en 1519 (P. Ingrid, 2011).

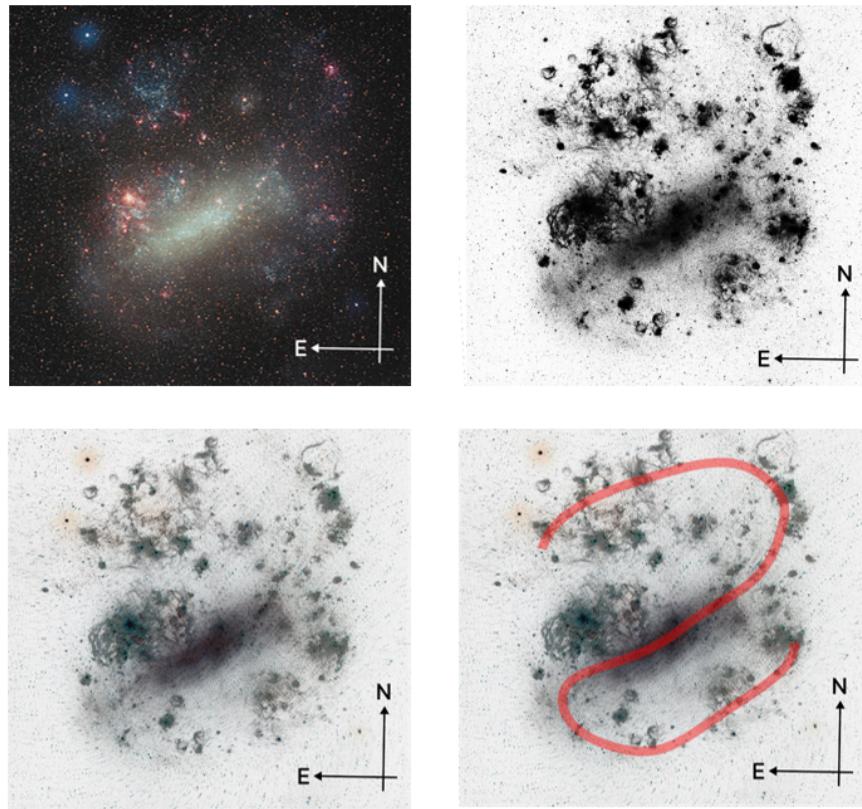
La LMC de acuerdo con P. Ingrid (2011) "se la clasifica como una galaxia tipo SB(s)m, es decir que se trata de una galaxia espiral barrada (SB) sin estructura de anillo (s) del tipo magallánico (m)"(p. 3). Sin embargo, en el espectro visible no se alcanza a apreciar la característica de espiral barrada de la galaxia, únicamente se distingue el bulbo central; en la figura 3 se evidencia una composición de imágenes de LMC en la banda visible (V) gracias a Slawik (2004) y en la banda del hidrógeno α adaptado de Gleason (2018), en donde se pueden observar los brazos espirales.

¹⁷ Del inglés, Super Massive Black Hole.

¹⁸ Del inglés, Milky Way.

Figura 3

Brazos espirales de LMC.



Nota. La figura 3 representa una composición de dos imágenes: en la parte superior izquierda se encuentra la LMC en la banda óptica, mientras que en la parte superior derecha se encuentra en la línea del hidrógeno α . En la parte inferior encontramos el apilamiento de las anteriores, donde se invierte la imagen de la banda óptica para un apilamiento correcto.

Como se puede observar en la figura 3 aparentemente los brazos espirales no siguen una estructura simétrica; esto se debe a que LMC cuenta con una inclinación de $i = 25.110^\circ \pm 0.365^\circ$ respecto a nuestro plano (Deb et al., 2018), la cual es indispensable para realizar correcciones al punto que se mide la distancia.

Paralaje

El Paralaje es un método geométrico para la determinación de distancias el cual se lleva usando desde 1838, cuando el astrónomo Friedrich Bessel publicó la primera distancia a un cuerpo celeste usando paralaje (ESA, 2019). Desde entonces el paralaje ha sido usado para determinar distancias a cuerpos celestes cercanos, ya que este depende del desplazamiento aparente de los cuerpos y este desplazamiento se reduce en cuanto el cuerpo se encuentra demasiado lejos del observador, puesto que el movimiento aparente será mínimo o nulo. La misión GAIA de la ESA hizo aportes importantes realizando mediciones de paralaje de más de 1.3 mil millones de objetos, en su mayor parte estrellas (de Bruijne et al., 2018; Utrilla Molina & Hutton, 2018; van Leeuwen et al., 2018).

Estrellas Variables Intrínsecas

Las estrellas variables son estrellas en las cuales su brillo aparente observado desde la tierra presenta cambios, estos se deben a factores intrínsecos o externos de la estrella.

Por el enfoque de la investigación nos centraremos en los factores intrínsecos, donde uno de ellos son las estrellas pulsantes, a su vez allí encontramos variables cefeidas, variables cefeidas de tipo ii y variables de tipo RR Lyrae; las cuales cada una sigue una tendencia de periodo-luminosidad (P-L) distintas (Soszyński & OGLE, 2018).

La relación periodo-luminosidad fue descubierta por la astrónoma americana Henrietta Swan Leavitt en 1912, al analizar más de 1700 estrellas de las cuales escogió un grupo de 25 que se encuentra en la pequeña nube de magallanes (SMC) y de allí determinó esta relación, la cual a su vez nos permite obtener la magnitud absoluta de cada estrella y por ende su módulo de distancia μ ; este método hoy en día es usado para la calibración de procedimientos y para la determinación de distancias con gran precisión desde el grupo local en adelante (Bing-Qiu et al., 2013; Deb et al., 2018; Leavitt & Pickering, 1912; Thabeb, 2013).

Velocidad de Recesión

La velocidad de recesión surge de la ley de Hubble-Lemaître, la cual relaciona la distancia a un objeto con su velocidad de recesión usando su corrimiento al rojo y el parámetro de Hubble (H_0); todo esto en un universo que está en constante expansión y toma un valor según Riess et al. (2023) de $67.4 \text{ Km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ siendo comprobado por el JWST.

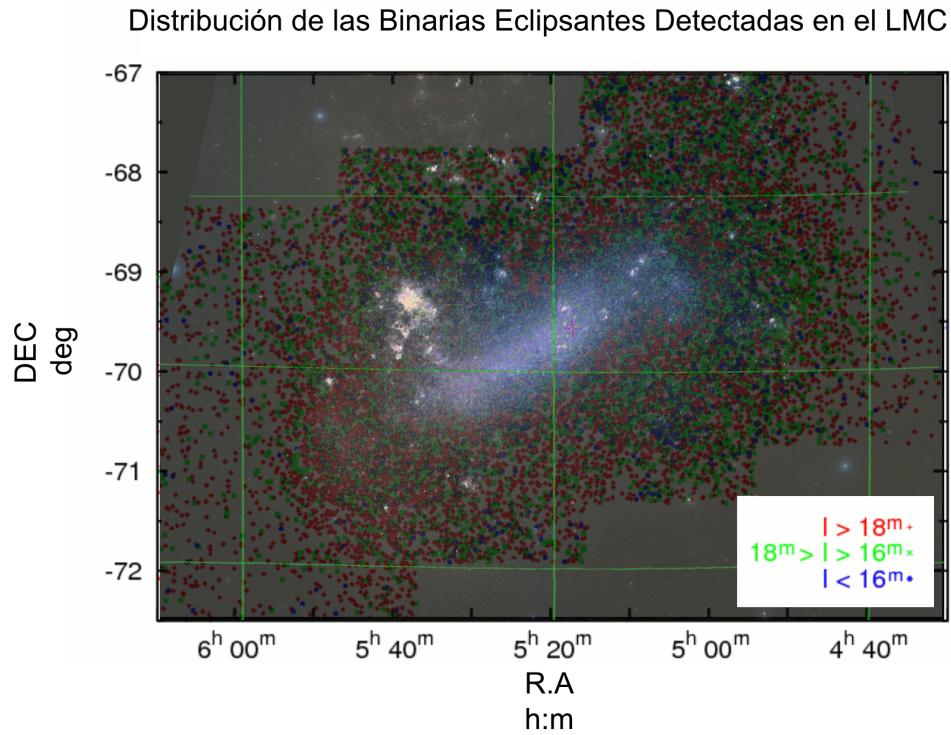
Binarias Eclipsantes

Las binarias eclipsantes son sistemas de estrellas que interaccionan gravitacionalmente donde su órbita permite que desde la tierra en ocasiones una de estas estrellas se oculte o eclipse a la otra; esto provoca cambios en la magnitud aparente de cada sistema (Association, 2012). Usando binarias eclipsantes tal como lo sostiene la investigación de Graczyk, D. et al. (2021) se pueden establecer relaciones de índice de color con respecto a parámetros como el brillo superficial (S_v) el cual fue indispensable en el procedimiento realizado por Pietrzynski, G. et al. (2013).

En el proyecto presentado por Graczyk et al. (2011) denominado *OGLE III*, el cual contiene 26,121 estrellas binarias eclipsantes (EBs) en LMC. La distribución de las estrellas encontradas en el catálogo de EBs de OGLE III se puede evidenciar en la figura 4.

Figura 4

Mapa de las EBs capturadas por OGLE III.



Nota. La figura 4 es una composición de la imagen del espectro visible capturada por Slawik (2004) y la distribución de las EBs según lo publicado por Graczyk et al. (2011). Cada estrella según su magnitud se representa de rojo, verde o azul.

De la contribución de 26,121 estrellas Pietrzynski, G. et al. (2013) tomó en cuenta los sistemas¹⁹ 03160, 01866, 09660, 10567, 26122, 09114, 06575 y 15260; los cuales se caracterizan por ser estrellas gigantes de masa intermedia. De este modo se determinó el valor de $d_{LMC} = 49.97$ Kpc, con una precisión estimada del 2.2 % (Pietrzynski, G. et al., 2013). Este valor se usa de referencia en esta investigación con el fin de comparar los métodos usados.

¹⁹ Sistemas del catálogo OGLE siguiendo la estructura de nomenclatura: OGLE-LMC-ECL-NNNNN.

OGLE

OGLE, por sus siglas en inglés, es el experimento de óptica gravitacional; el cual, se inició con el objetivo de la búsqueda de materia oscura mediante el uso de microlentes gravitacionales y ha tenido grandes aportes y reconocimientos; el proyecto actualmente cuenta con 4 fases (OGLE-I, OGLE-II, OGLE-III y OGLE IV). Su primera fase tuvo inicio en 1992 y el experimento se encuentra aún en progreso. Gran parte de las observaciones registradas se han hecho haciendo uso del observatorio de Las Campanas en Chile (Team, 2022).

Las estrellas de LMC y SMC son de gran interés para el proyecto OGLE debido a que son las más afectadas por las lentes gravitacionales del halo galáctico; este es uno de los principales motivos de que gran parte de OGLE se haya centrado en estudiar estas regiones.

Telescopio Espacial James Webb

El telescopio espacial James Webb, es un telescopio infrarrojo de 6.5m de apertura lanzado el 25 de diciembre de 2021; Webb hace parte de los telescopios de nueva generación producto de una colaboración internacional entre la NASA, ESA y la CSA (NASA, 2021a). El objetivo primordial de Webb es estudiar cada fase de la historia de nuestro universo.

En esta investigación se usarán mediciones realizadas con los instrumentos de Webb: MIRI y NIRSpec.

MIRI.

El Instrumento del infrarrojo medio (Mid-Infrared) cuenta con una cámara y un espectrógrafo enfocado en analizar el infrarrojo medio del espectro electromagnético, cubriendo el rango de longitud de onda de 5 a 28 μm ; MIRI logra esta sensibilidad gracias al conservar una temperatura operativa de 7 °K (NASA, 2021b).

NIRSpec.

Por sus siglas en inglés, el espectrógrafo del infrarrojo cercano opera en un rango de 0.6 a $5 \mu m$; capaz de realizar 100 mediciones simultáneas gracias a innovaciones realizadas en su construcción (NASA, 2021c).

Unidades de Distancia en el Universo

Al medir distancias en el universo nos encontramos con diferentes unidades que son usadas comúnmente a pesar de no estar de manera directa en el sistema internacional. Estas unidades surgen como respuesta al problema de las escalas en el universo; al medir distancias en el sistema solar usamos el sistema internacional y las unidades astronómicas (A.U.)²⁰, al medir distancias en los alrededores del sistema solar usamos los años luz, cuando se habla de distancias más allá del sistema solar son usados los pc²¹ y Mpc (NASA, 2020). Las unidades anteriormente mencionadas se encuentran representadas en la tabla 2 con su respectiva equivalencia en el sistema internacional.

Tabla 2

Unidades de Distancia Cósmicas.

Nombre	Símbolo	Equivalencia en el S.I. ²²
Unidad Astronómica	A.U.	$1.4959 \times 10^{11} m$
Año Luz	ly	$2.4605 \times 10^{15} m$
Parsec	pc	$3.0856 \times 10^{16} m$

²⁰ Del inglés, Astronomical Unit.

²¹ Unidad de distancia, parsec.

²² Siglas, Sistema Internacional.

Formato de números

Se aclara que para esta investigación se usa el Sistema Internacional de Unidades, en este caso, el punto denota separación decimal ($1.5 = 3/2$). Asimismo, durante la investigación se usa en lo posible hasta 4 cifras decimales y siguiendo con las recomendaciones de Chen et al. (2022) cada valor obtenido cuenta con su respectivo error sistemático y error estándar.

Metodología

Tipo y Ámbito de Estudio

Este es un trabajo de acercamiento a la metodología e investigación el cual se realiza como trabajo de grado de Bachiller Académico en el Colegio Andino de Tunja. Durante la elaboración del proyecto se contó con la tutoría y asesoramiento de docentes del Colegio Andino de Tunja.

Fuentes de Información

La mayor parte de la información tomada como referencia proviene de las revistas científicas: *The Astrophysical Journal*, *Astronomy and Astrophysics*, *astrophysics data system* y *arxiv - Astrophysics*. Asimismo, en su mayoría se usaron las siguientes bases de datos: SIMBAD y NASA/IPAC Extragalactic Database.

Datos Analizados

En este estudio se han analizado según el método de cálculo de distancias los siguientes datos: paralaje, ángulo de paralaje (π); estrellas variables, curvas de luz, relaciones P-L, módulos de distancia (μ), extinción interestelar; binarias eclipsantes, tamaño angular (mas), módulo de distancia (μ); velocidad de recesión, parámetro de Hubble (H_0), corrimiento al rojo (z); tercer ley de Kepler, periodo orbital, semieje mayor, masa de la Vía Láctea (M_{MW}); supernova SN1987a, tamaño angular, radio.

Fuentes de Información

Los datos analizados fueron recuperados de *Mikulski Archive for Space Telescopes* (MAST) en el caso de los datos analizados provenientes de los telescopios espaciales JWST, HST e IUE²³. De igual modo, se usó el telescopio espacial GAIA mediante la librería de *Python*: astroquery.gaia. Finalmente, se usó el catálogo de binarias eclipsantes en LMC abierto al público gracias a la colaboración de Wyrzykowski et al. (2003) en el proyecto OGLE.

Diseño Metodológico

Con el fin de calcular la distancia a LMC, se ha llevado a cabo un análisis estadístico usando 6 métodos diferentes para la determinación de esta distancia, así como la comparación de cada método; los cuales se describen en próximos apartados

Variables de Análisis

Se ha estimado la distancia a la LMC definida en el documento como (d_{LMC}). Del mismo modo, en la presente investigación se incluyen las variables anteriormente presentadas.

En la determinación de esta distancia se tiene en cuenta la inclinación brindada por la investigación de Deb et al. (2018) de $i = 25.110^\circ \pm 0.365^\circ$ en los métodos geométricos de determinación de distancias.

²³ Del inglés, International Ultraviolet Explorer.

Programas Empleados

Se ha empleado scripts²⁴ realizados en el lenguaje de programación Python²⁵ 3.9.13. para la obtención de información de GAIA, así como su posterior análisis; la elaboración de la figura 1. Asimismo, se hizo uso de las herramientas y utilidades incorporadas en MAST; de la plataforma JS9 para el procesamiento de imágenes FITS²⁶ y de *Microsoft Excel* para la elaboración de gráficas y análisis estadístico de los procedimientos.

Procedimiento

A continuación se presenta el procedimiento realizado para la determinación de la distancia a la Gran Nube de Magallanes mediante el uso de 6 métodos distintos.

Paralaje

Mediante el uso de los datos de GAIA y su integración en Python, se crea un script²⁷ en el cual se identifican 696,321 estrellas (de Bruijne et al., 2018; Eyer et al., 2018; Hobbs, Clotet et al., 2018; Hobbs, Lindegren et al., 2018; Salgado et al., 2018; Utrilla Molina & Hutton, 2018; van Leeuwen et al., 2018) las cuales se encuentran en un radio de 12° alrededor de la coordenada ecuatorial absoluta del centro de la LMC (α, δ)_{J2000} (5^h17^m , $-69^{\circ}02'$). (P. Ingrid, 2011). Posteriormente, de estas 696,321²⁸ estrellas se descartaron las que no contaban con información de paralaje, obteniendo de esta manera 576,121 estrellas; de las cuales se analizan los parámetros indicados en la tabla 3 en la cual se recorta la muestra de estrellas a 336,975; estableciendo un rango de 0.5σ de tolerancia.

²⁴ Programa interpretado por un lenguaje de programación.

²⁵ Lenguaje de programación

²⁶ Del inglés, Flexible Image Transport System.

²⁷ Ver apéndice B.

²⁸ Para el registro total de estrellas usadas ver repositorio del proyecto

Tabla 3*Análisis de Datos: Paralaje*

Desviación Estándar	Promedio	Paralaje	+0.5 σ	-0.5 σ
σ	mas	mas	mas	mas
0.9858	0.2576	0.7506	-0.2352	

Nota. Se establece el siguiente rango aceptado de π : $[-0.2352 \text{ mas}, 0.7506 \text{ mas}]$

Finalmente, transformando π de *mas* a *arcsec*, se utiliza la aproximación cuando $\theta << 1$ de $\tan(\theta) \approx \theta$, obteniendo así d_{LMC} en parsecs mediante la ecuación 1.

$$d_{LMC} = \frac{1}{\pi(\text{arcsec})} \quad (1)$$

Tabla 4*Datos recopilados de GAIA.*

ID*	α_{J2000}	δ_{J2000}	π	Error	G ²⁹	d_{LMC}
	deg ³⁰	deg	mas	mas	mag	Kpc
465454800533777	73.1239	-71.7573	0.0186	± 0.7	18.96	53.7380
465453361291771	74.5500	-71.5012	0.0385	± 0.1	15.54	25.9904
466055477912470	80.4833	-65.8301	-0.0166	± 0.04	11.62	60.3212

Nota. La tabla 4 nos muestra 3 de los 336,975 registros obtenidos por GAIA y el formato en que fueron usados como se puede encontrar en el repositorio de esta investigación.

Se determina la distancia en Kpc a cada una de las 336,975 estrellas. Además, se obtiene su promedio, desviación estándar (σ) y su error estándar. Del mismo modo, para

²⁹ Magnitud (mag) aparente en la banda G.

³⁰ Del inglés, grados.

obtener el error sistemático se tuvo en cuenta que GAIA cuenta con las siguientes incertidumbres: para estrellas con magnitudes mayores a $14 \pm 0.04mas$, para estrellas con magnitudes entre 14 y $17 \pm 0.1mas$ y para estrellas con magnitudes menores a $17 \pm 0.7mas$ (Luri, X. et al., 2018). De este modo, se presentan los datos mencionados en la tabla 5.

Tabla 5

Distancia a LMC mediante paralaje.

d_{LMC}	Error Estándar	Error Sistemático
Kpc	Kpc	Kpc
41.2459	± 3.5611	± 0.3991

Variables de tipo RR Lyrae

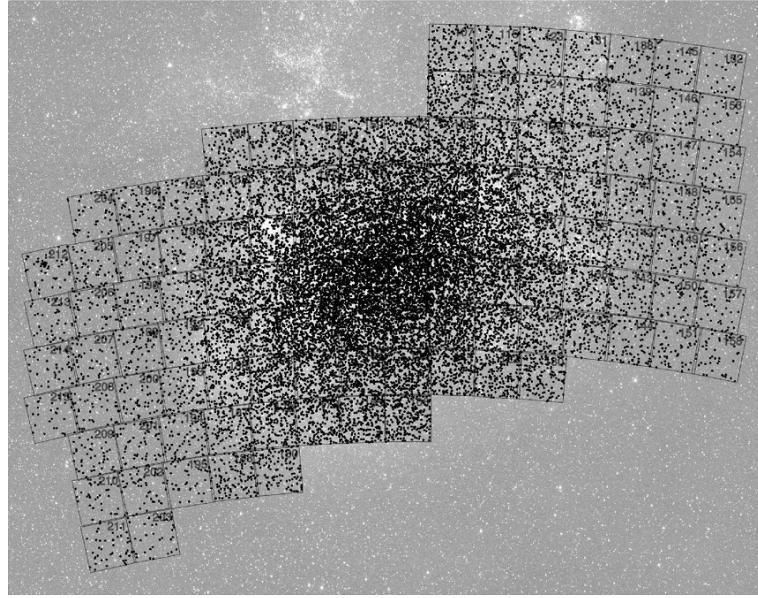
En la presente investigación se van a usar estrellas del tipo RR Lyrae para determinar la distancia a LMC mediante el uso del módulo de distancia (μ) y la relación P-L. Gracias a P. Ingrid (2011) sabemos que en LMC hay más de 24900 estrellas variables de tipo RR Lyrae.

En el caso de las variables de tipo RR Lyrae se hizo uso del catálogo públicamente disponible OGLE III³¹ Soszynski et al. (2009) y se seleccionaron 17,693 estrellas del tipo RR Lyrae. La ubicación de estás se puede observar en la figura 5 (Soszynski et al., 2009).

³¹ Del inglés, Optical Gravitational Lensing Experiment.

Figura 5

Mapa de las RR Lyrae capturadas por OGLE III.



Nota. La figura 2 representa ubicación de las estrellas registradas por OGLE III (Soszynski et al., 2009).

Teniendo en cuenta que contamos con estrellas variables del tipo RR Lyrae, presentan una relación P-L en la banda infrarroja. La relación P-L tal como lo presenta Catelan et al. (2004) en este caso está dada por:

$$M_I = 0.471 - 1.132 \log(P_{\text{días}}) + 0.205 \log(z) \quad (2)$$

Nota. En la ecuación 2 tenemos P que representa el periodo de la estrella en días y a z , el cual es un coeficiente de metalicidad.

Como podemos observar en la ecuación 2 necesitamos el valor z . Asimismo, en la figura 5 podemos evidenciar que la gran parte de las muestras de estrellas se encuentran en el bulbo galáctico, gracias a esta ubicación y a la investigación de Choudhury et al. (2021) tenemos que $z = 0.008 \pm 0.001$. Aplicando la relación P-L y el valor de z ahora conocido,

podemos encontrar la magnitud absoluta (M_I) para a su vez hallar el módulo de distancia (μ) y posteriormente determinar la distancia mediante:

$$\mu = m - M \quad (3)$$

$$d_{LMC} = 10^{(\frac{\mu+5}{5})} \quad (4)$$

Tabla 6

Datos de variables RR Lyrae recopilados de OGLE III.

ID*	m_v	m_I	P	Error (P)	M_I	d_{LMC}
	mag	mag	días	días	mag	Kpc
OGLE-LMC-RRLYR-09258	13.23	13.77	0.5534047	± 0.0000006	0.34	3.7800
OGLE-LMC-RRLYR-19082	18.46	19.04	0.6064705	± 0.0000002	0.29	43.0629
OGLE-LMC-RRLYR-11840	18.63	19.16	0.6247962	± 0.0000013	0.28	46.7123

Nota. La tabla 6 nos muestra 3 de los 17,693 registros obtenidos por OGLE y el formato en que fueron usados como se puede encontrar en el repositorio de esta investigación.

Finalmente, de este modo y mediante el promedio de las distancias obtenidas con las 17,693 estrellas obtenemos la distancia a LMC usando estrellas variables de tipo RR Lyrae, junto a sus respectivo error estándar y sistemático como se puede observar en la tabla 7.

Tabla 7

Distancia mediante estrellas RR Lyrae.

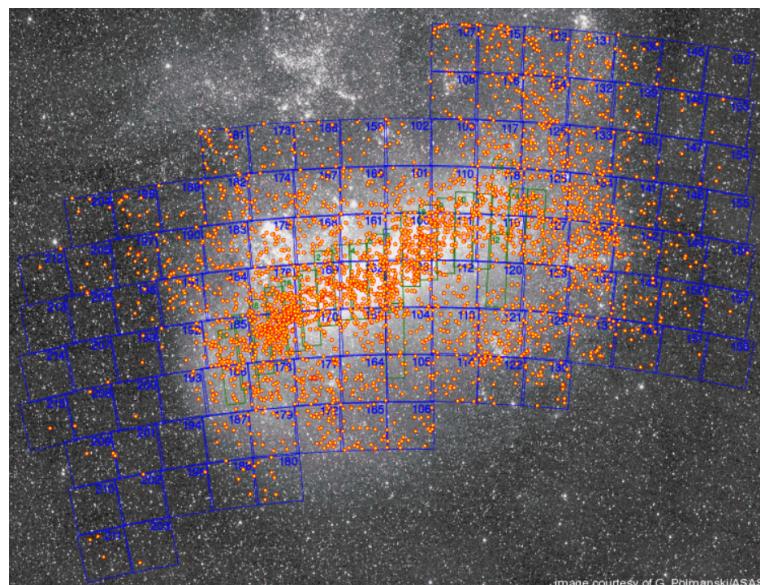
d_{LMC}	Error Estándar	Error Sistemático
Kpc	Kpc	Kpc
49.9979	± 0.0503	± 0.0481

Variables Cefeidas Clásicas

En el caso de las variables cefeidas clásicas se hizo uso del mismo modo del catálogo de OGLE, en este caso para variables cefeidas (Soszynski et al., 2008) donde se seleccionaron registros de 1,80e estrellas, la ubicación de estas puede encontrarse en la figura 6.

Figura 6

Mapa de las cefeidas clásicas capturadas por OGLE III.



Nota. La figura 6 representa ubicación de las estrellas seleccionadas en color amarillo (Soszynski et al., 2008).

A continuación se hace uso de las siguientes relaciones P-L de acuerdo a la banda que se esté analizando: M_V y M_I adaptadas de la investigación de Madore et al. (2017); y el módulo de distancia directamente μ_W adaptadas de la investigación de Ngeow (2012) usando el índice de color ($V - I$) y la función de Wesenheit. En el caso de M_V y M_I se ajustó a las extinciones interestelares³² que nos presenta Imara y Blitz (2007) con un valor

³² Corrección realizada teniendo en cuenta las masas de polvo que pueden interferir con los resultados.

de $A_V = 0.3 \text{ mag}$, y con los aportes de la München (1999) tenemos que $A_I = 0.48 \times A_v \text{ mag}$; en el caso de μ_W no se tiene en cuenta la extinción interestelar puesto que internamente la ecuación tiene en cuenta el índice de color ($V - I$) el cual tiene en cuenta la extinción. De este modo obtenemos las ecuaciones 5, 6 y 7.

$$M_V = -2.670[\log(P_{días}) - 1.0] - 3.944 + A_V \quad (5)$$

$$M_I = -2.983[\log(P_{días}) - 1.0] - 4.706 + A_I \quad (6)$$

$$\mu_W = I - 1.55(V - I) + 3.313\log(P_{días}) + 2.639 \quad (7)$$

En la tabla 8 pueden ser observados los datos que se tuvieron en cuenta así como el formato en el que se encuentran en el repositorio de la investigación.

Tabla 8*Datos de Cefeidas recopilados de OGLE III.*

ID ³³	m_I	m_V	Periodo	Incertidumbre (P)	M_I	M_V	μ_W	$d_{LMC} (V)$	$d_{LMC} (I)$	$d_{LMC} (\mu_W)$
	mag	mag	días	días	mag	mag	mag	Kpc	Kpc	Kpc
0986	12.41	13.35	31.0504	± 0.000482	-4.96	-6.03	18.50	45.8526	48.6819	51.1498
1058	12.48	13.39	30.3989	± 0.000517	-4.93	-6.00	18.54	46.1154	49.5990	48.9571
0821	12.61	13.75	25.8032	± 0.000113	-4.74	-5.79	18.49	49.9843	47.8635	50.5916
0535	12.64	13.57	17.2755	± 0.000149	-4.28	-5.27	17.45	37.1183	38.1814	50.5667
2019	12.70	13.64	28.1034	± 0.000237	-4.84	-5.90	18.53	49.6177	52.5932	48.3640

Nota. En la tabla 8 se muestran 5 de los 1,804 estrellas³⁴.

³³ Se omitió el prefijo identificador de cada estrella dejando únicamente el valor numérico de este. Prefijo: OGLE-LMC-CEP-.

³⁴ Ver repositorio de la investigación para acceder a la totalidad de los registros.

De este modo, con el módulo de distancia descrito en la ecuación 3 y la d_{LMC} descrita en la ecuación 4 determinamos la distancia a la LMC usando la banda visible, infrarroja y el índice de color (V-I) descrito en la ecuación 7. Con la disponibilidad de estas 3 distancias, se realiza un promedio comparando sus respectivo error estándar y error sistemático; datos representados en la tabla 9.

Tabla 9

Distancia mediante estrellas Cefeidas Clásicas.

Variables	d_{LMC} (V)	d_{LMC} (I)	d_{LMC} (mu)	d_{LMC}
	Kpc	Kpc	Kpc	Kpc
Promedio	50.4981	50.2015	50.7794	50.4930
Error Estándar	± 0.2173	± 0.1312	± 0.0747	± 0.1411
Error Sistemático	± 0.0001	± 0.0002	± 0.0003	± 0.0002

Corrimiento al rojo

Al determinar la distancia a un cuerpo usando el corrimiento al rojo se tiene en cuenta lo establecido por la Ley de Hubble-Lemaître de la cual se usarán las ecuaciones 8 y 9. Para esto se debe establecer el parámetro z el cual representa el corrimiento al rojo o al azul, definido en la ecuación 10.

$$\nu = H_0 \times d \quad (8)$$

$$\nu = cz \quad (9)$$

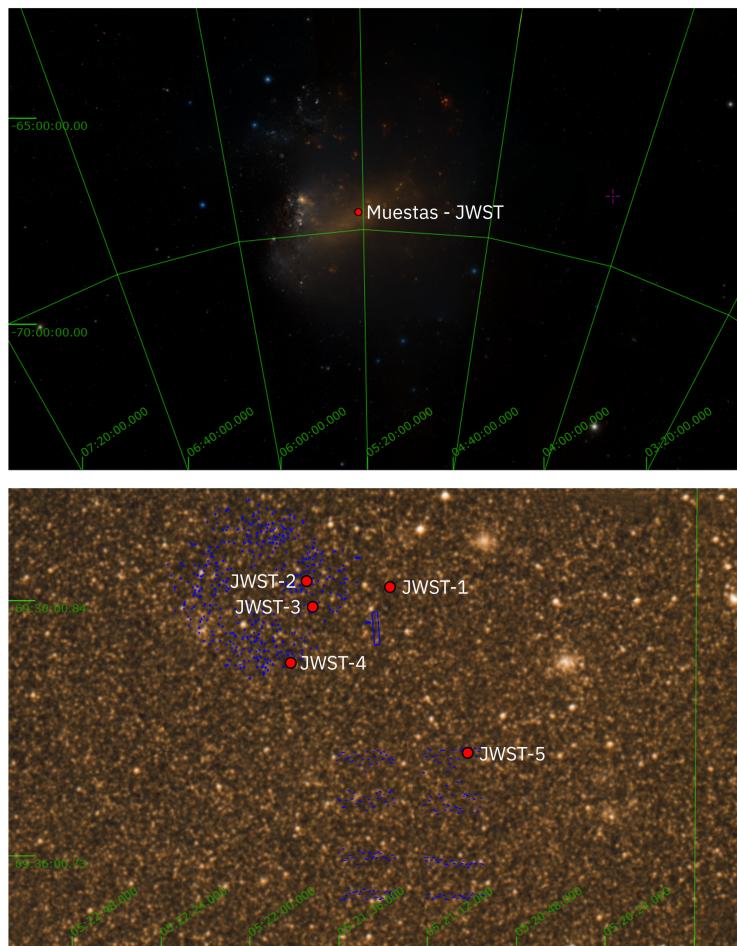
$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{rest}}{\lambda_{rest}} \quad (10)$$

A continuación se seleccionan 5 regiones de interés en LMC con el fin de determinar el corrimiento al rojo al analizar longitudes de onda de interés y su desplazamiento respectivo. Se hizo uso del telescopio espacial JWST con el instrumento NIRSPEC/MSA y

MIRI, los cuales permiten observar el espectro de estas 5 regiones. En la figura 7 se representa la ubicación de las 5 regiones analizadas (Sanchez, 2023). Adicionalmente, estas regiones se detallan con precisión en la tabla 10.

Figura 7

Mapa muestras LMC tomadas por el JWST.



Nota. La figura 7 representa ubicación de las regiones seleccionadas con un punto rojo. La imagen fue realizada con ayuda de STScI (2023) y su herramienta *Astroview*.

Posteriormente, se presenta el espectro original de cada región acompañado de el espectro con el ajuste de líneas espectrales con el fin de determinar el corrimiento al rojo.

Tabla 10

Regiones seleccionadas en LMC usando el JWST.

ID Local ³⁶	ID MAST ³⁷	α_{J2000} deg	δ_{J2000} deg	Instrumento	λ_{min} Å	$\lambda_{máx}$ Å	t_{exp} ³⁵ s
JWST-1	jw01029-o009_t007_miri_p750l	80.3500	-69.4942	MIRI/SLIT	30000	140000	299.704
JWST-2	jw01117-o007_s00051_nirspec_clear-prism	80.4923	-69.4971	NIRSPEC/MSA	8500	53600	875.334
JWST-3	jw01117-o022_s89012_nirspec_f100lp-g140m	80.4913	-69.4976	NIRSPEC	10000	19000	1313
JWST-4	jw01117-o032_s34975_nirspec_f100lp-g140m	80.4894	-69.4964	NIRSPEC	9660	19000	2626
JWST-5	jw01473-o016_s00048_nirspec_clear-prism	80.4888	-69.4994	NIRSPEC/MSA	5690	53400	1313

Nota. En la tabla 10 se muestran las 5 regiones previamente mencionadas acompañadas de las características de cada medición.

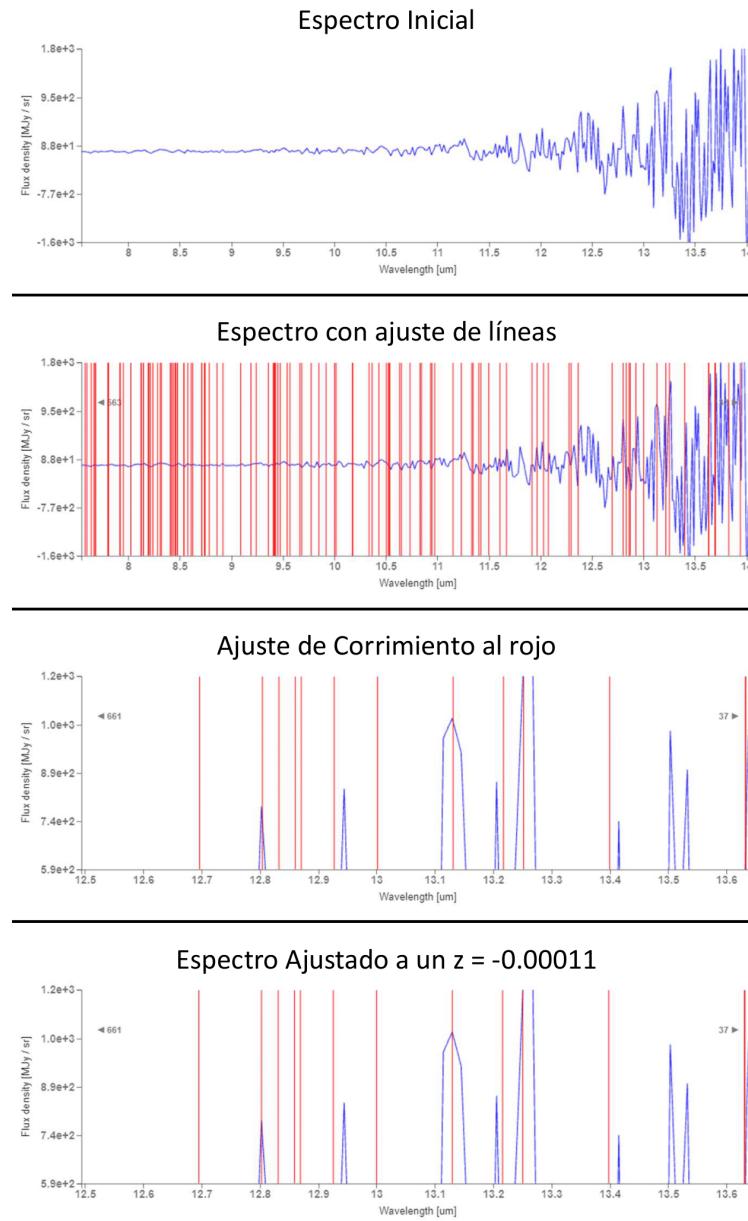
³⁵ Tiempo de exposición de la captura.

³⁶ ID creado para la investigación presente.

³⁷ ID original de la base de datos MAST.

Figura 8

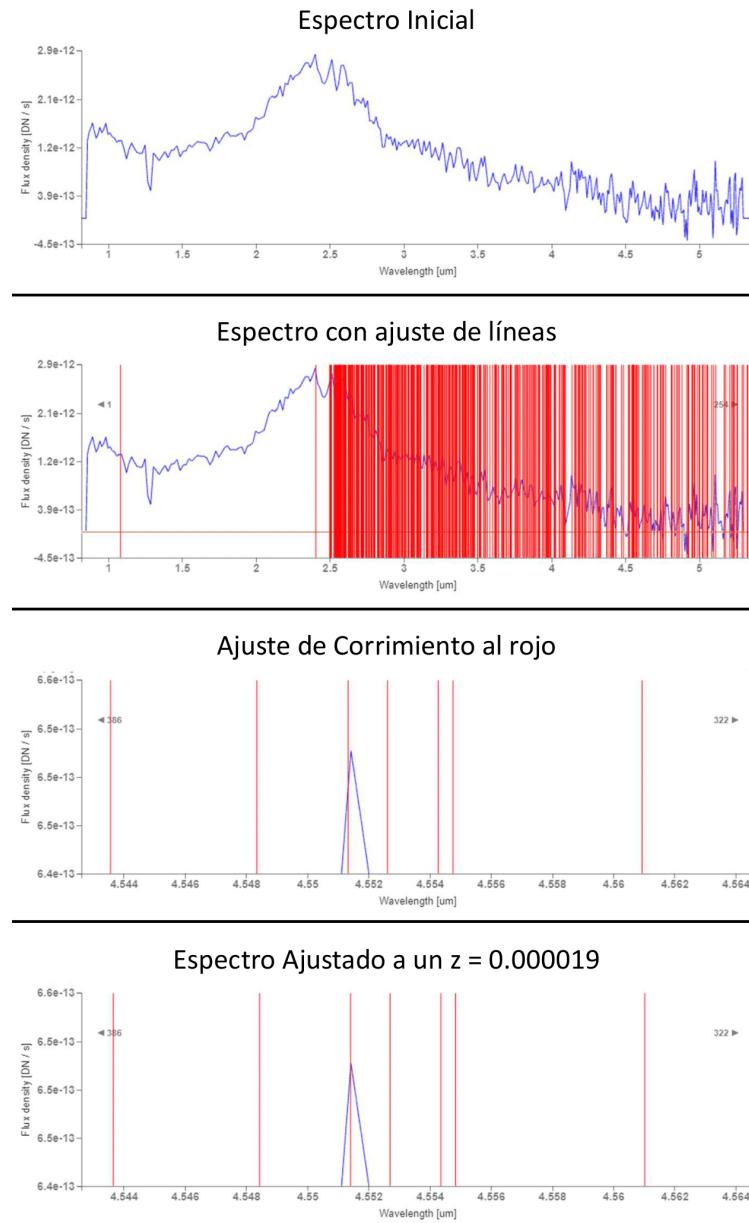
Resultados corrimiento al rojo JWST-1.



Nota. La figura 8 es una composición de los pasos que se llevaron a cabo para determinar el z de cada región.

Figura 9

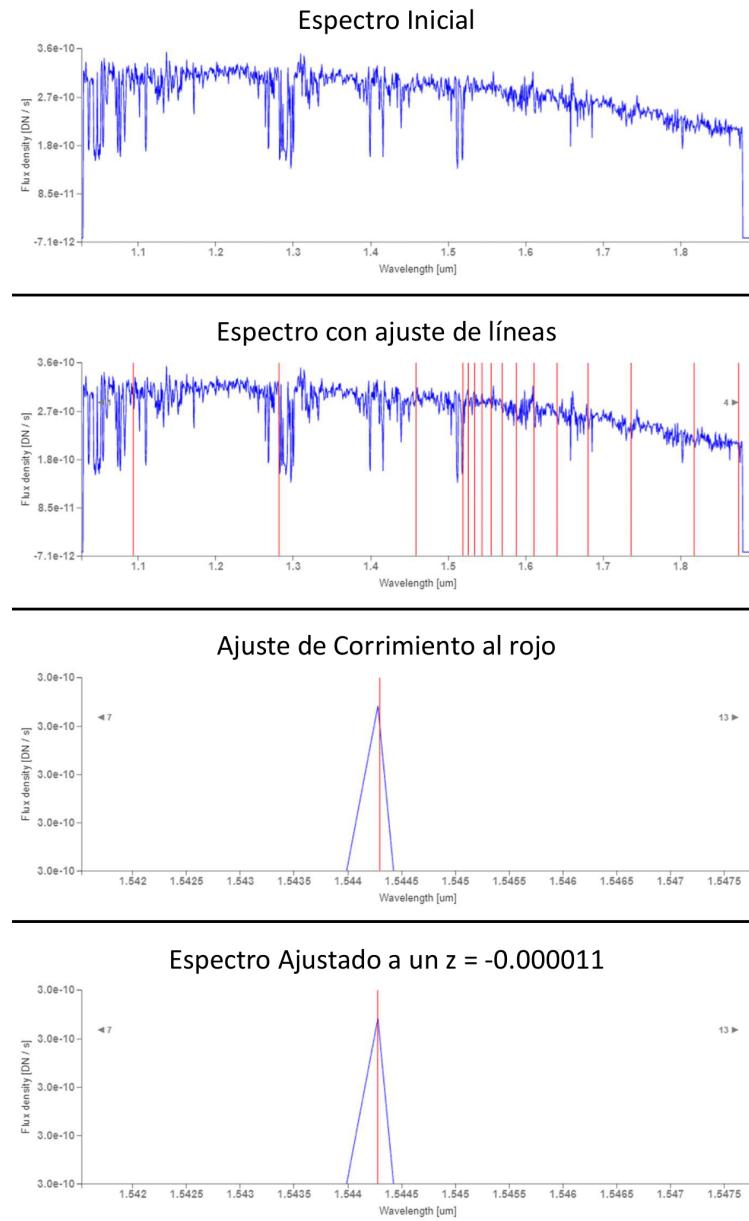
Resultados corrimiento al rojo JWST-2.



Nota. La figura 9 es una composición de los pasos que se llevaron a cabo para determinar el z de cada región.

Figura 10

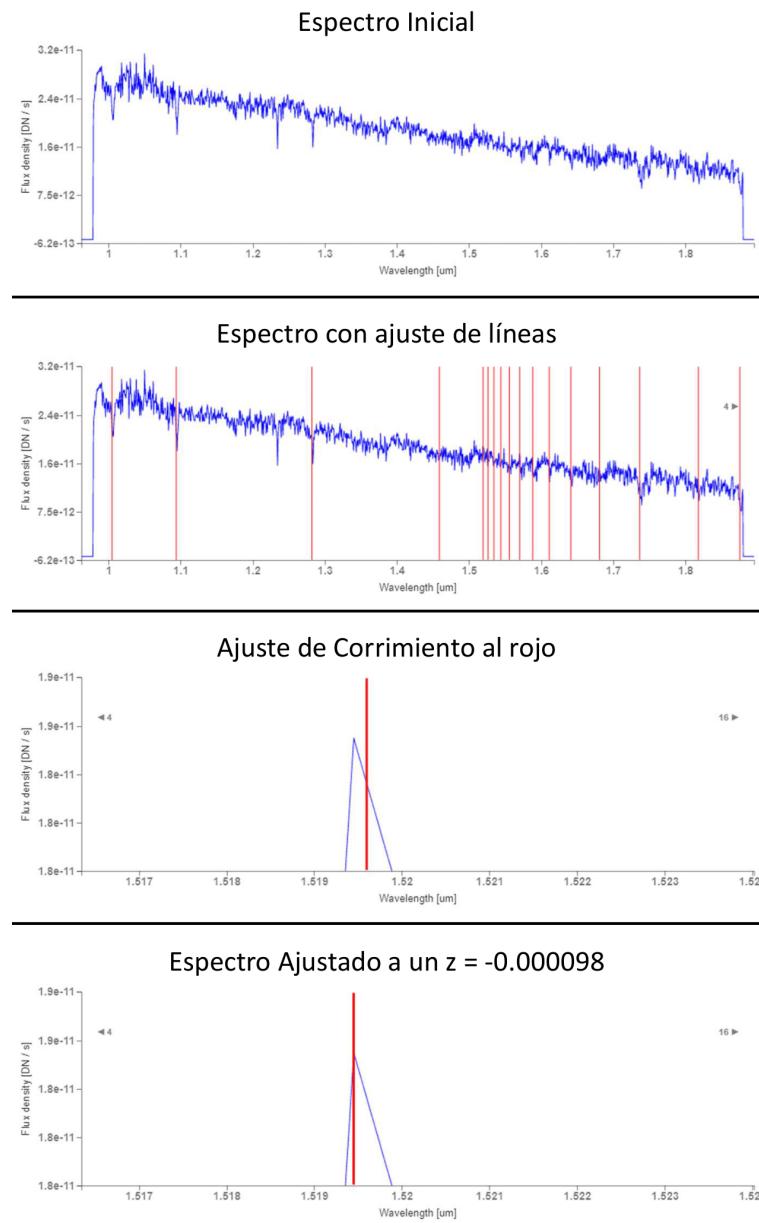
Resultados corrimiento al rojo JWST-3.



Nota. La figura 10 es una composición de los pasos que se llevaron a cabo para determinar el z de cada región.

Figura 11

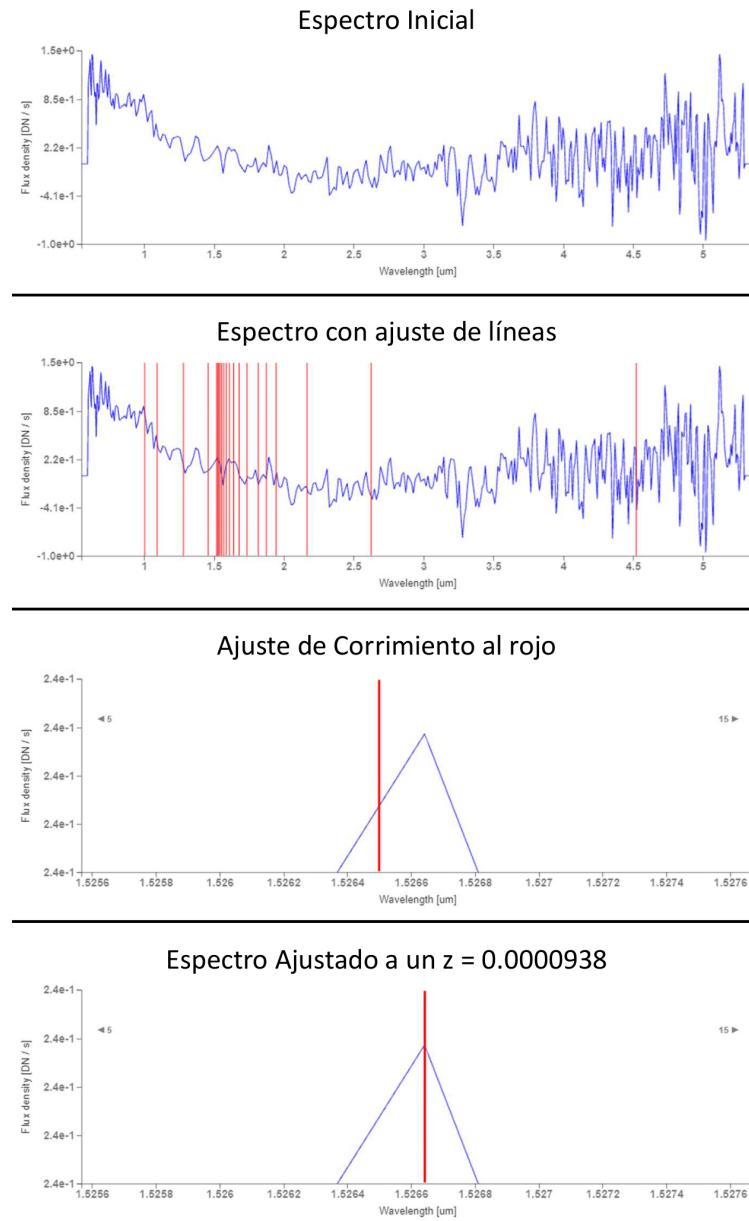
Resultados corrimiento al rojo JWST-4.



Nota. La figura 11 es una composición de los pasos que se llevaron a cabo para determinar el z de cada región.

Figura 12

Resultados corrimiento al rojo JWST-5.



Nota. La figura 12 es una composición de los pasos que se llevaron a cabo para determinar el z de cada región.

La información detallada de las figuras 8, 9, 10, 11 y 12; se encuentra en la tabla 11. El valor de z se obtuvo usando la ecuación 10. Los grupos de líneas escogidas se seleccionaron con relación al rango de longitudes de onda que se analizaron; posteriormente, la línea de referencia se determinó en base a los picos diferenciados del espectro que presentaran un desfase en relación al grupo de líneas escogidas.

Tabla 11

Resultado corrimiento al rojo de las 5 regiones seleccionadas.

ID	Líneas Usadas	Línea de Referencia	λ	z
				μm
JWST-1	H2-ISO	H2 10-10 S(6)	13.1313	-0.000110
JWST-2	H2-ISO	H2 11-10 S(7)	4.5513	0.000019
JWST-3	H-Paschen-Brackett	HI 17-4	1.5443	-0.000011
JWST-4	H-Paschen-Brackett	HI 20-4	1.5196	-0.000098
JWST-5	H-Paschen-Brackett	HI 19-4	1.5265	0.000093

Usando las ecuaciones 8 y 9, podemos derivar la ecuación 11 en relación a la distancia. Al derivar esta ecuación nos encontramos con el parámetro de Hubble (H_0), el cual, gracias a la investigación de Riess et al. (2023) se tomará como $67.4 \text{ Km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Finalmente, la tabla 12 enseña las distancias obtenidas mediante usando el corrimiento al rojo en 5 regiones de LMC determinado por el análisis del espectro brindado por el JWST.

$$d_{LMC} = \frac{c \times z}{H_0} \quad (11)$$

Como se evidencia en la tabla 12 se obtienen valores bastante dispersos; donde se obtiene un $\sigma = 210.0766 \text{ Kpc}$. En la tabla 13 se encuentra el resultado promedio junto a el error estándar y sistemático.

Tabla 12

Distancia usando el z de las 5 regiones seleccionadas.

ID	z	d_{LMC}
Local		Kpc
JWST-1	-0.00011	489.2715
JWST-2	0.000019	84.51053
JWST-3	-0.000011	48.9271
JWST-4	-0.000098	435.8964
JWST-5	-0.000093	413.6568

Tabla 13

Distancia a LMC usando corrimiento al rojo.

d_{LMC}	Error Estándar	Error Sistemático
Kpc	Kpc	Kpc
294.4632	± 93.9525	± 2.1844

Si se analizan los valores de z encontramos valores tanto positivos como negativos; se tiene que tener en cuenta el movimiento propio de rotación de la galaxia puesto que este influye en el valor de z registrado. Además, el uso de este método está condicionado por el valor de H_0 el cual, por su planteamiento, no es una constante y presenta incertidumbres demasiado altas.

Mecánica Celeste

Usando mecánica celeste existen distintos métodos para determinar la distancia de un cuerpo al centro de masa del sistema. Uno de estos métodos surge gracias a Russell (1964), donde conociendo parámetros orbitales como lo son su masa y periodo de rotación se puede determinar el semieje mayor de la órbita; para esto despejamos esta distancia de la ecuación 12 y obtenemos el a mediante la ecuación 13.

$$P^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{GM} \quad (12)$$

$$a = \left(\frac{T^2 GM}{4\pi^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

Para resolver la ecuación 13, M representa la suma de las masas del sistema, las cuales son $M_{MW} + M_{LMC}$, donde $M_{LMC} = 8.7 \pm 4.3 \times 10^9 M_\odot$ y $M_{MW} = 4.3 \times 10^{11} M_\odot$; así como P, el cual representa el periodo orbital el cual se estima alrededor de 1.5×10^9 años (Van der Marel et al., 2002). De este modo, obtenemos que $a = 48.275 \pm 0.1575$ Kpc.

Teniendo en cuenta que este valor de a representa la distancia teniendo en cuenta el centro de masa de ambos cuerpos tenemos que realizar un análisis geométrico para determinar la distancia a la tierra, en esta investigación se hace la aproximación de que LMC describe una órbita circular o $e \approx 0$. En primer lugar hay que determinar la separación angular entre el centro galáctico (α_{GC}, δ_{GC}) y LMC ($\alpha_{LMC}, \delta_{LMC}$) mediante el uso de la ley de cosenos, en este caso de trigonometría esférica, la cual se describe en la ecuación 14 con la información de SIMBAD (2023) en la tabla 14.

Tabla 14

Coordenadas CG y LMC.

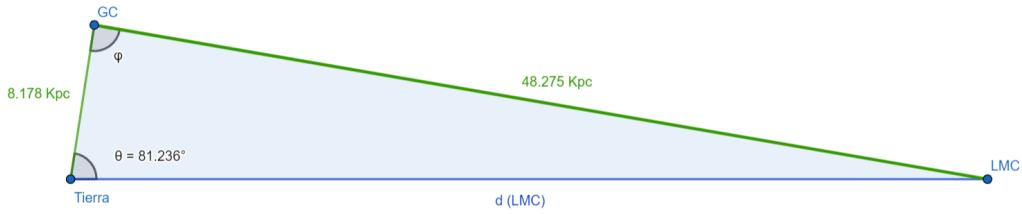
Objeto	α_{J2000}		δ_{J2000}	
	hh:mm:ss		deg:mm:ss	
GC	17 ^h 45 ^m 39.60 ^s		-29° 00 ^m 22.00 ^s	
LMC	05 ^h 23 ^m 34.60 ^s		-69° 45 ^m 22.00 ^s	

$$\theta = \text{arc cos} [\sin(\delta_{LMC}) \cdot \sin(\delta_{GC}) + \cos(\delta_{LMC}) \cdot \cos(\delta_{GC}) \cdot \cos(\alpha_{GC} - \alpha_{LMC})] \quad (14)$$

De este modo se obtiene una separación angular de $\theta = 81.23^\circ$. En la figura 13 observamos las separaciones angulares anteriormente obtenidas junto a d_{LMC} , el valor de a y $d_{\oplus-GC}$ equivalente a 8.178 Kpc (Abuter et al., 2019).

Figura 13

Análisis geométrico posición de LMC respecto a la Tierra.



Nota. La figura 13 muestra la posición del centro galáctico (GC), de LMC y de la Tierra.

Finalmente, mediante el uso de leyes de senos como se describe en la ecuación 16 indicando las incertidumbres de cada medida tomada., se determina d_{LMC} obteniendo un valor de 48.6957 Kpc, como se puede observar con más detalle en la tabla 15.

$$\phi = \arcsin \left(\frac{\sin(82.23^\circ)}{48.275 \pm 0.1575 \text{ Kpc}} \cdot 8.178 \pm 0.175 \text{ Kpc} \right) \quad (15)$$

$$d_{LMC} = \sin(180^\circ - 82.23^\circ - \phi) \cdot \frac{48.275 \pm 0.1575 \text{ Kpc}}{\sin(82.23^\circ)} \quad (16)$$

Tabla 15

Distancia a LMC usando Mecánica Celeste.

d_{LMC}	Error Estándar	Error Sistemático
Kpc	Kpc	Kpc
48.275	± 0.0922	± 0.1598

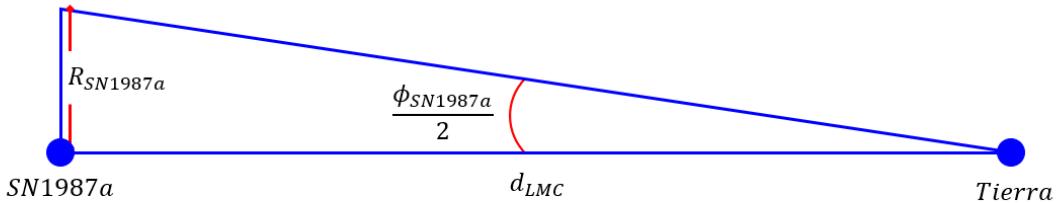
Supernova SN1987a

La supernova SN1987a, fue producto de lo que se cree una colisión la cual involucraba una supergigante azul; la cual produjo una supernova de tipo II que alberga una estrella de neutrones en su interior (Overbye, 2020). Su descubrimiento el 24 de febrero de 1987 ha sido de gran relevancia en la astronomía gracias a la cercanía de esta al estar ubicada en la LMC; del mismo modo, teniendo en cuenta que la última supernova registrada fue la supernova de Kepler SNR1604, hoy en día contamos con la capacidad de poder observar evolución de esta supernova con nuevas tecnologías, como lo es el JWST.

Se tiene que tener en cuenta que SN1987a se encuentra en LMC, cercana a NGC2070. Este método se basa en un análisis geométrico representado en la figura 14, donde se determinará la distancia mediante la ecuación 17.

Figura 14

Análisis geométrico de SN1987a respecto a la Tierra.



Nota. En la figura 14 $R_{SN1987a}$ representa el radio de la supernova en metros y ϕ denota el diámetro angular de la supernova.

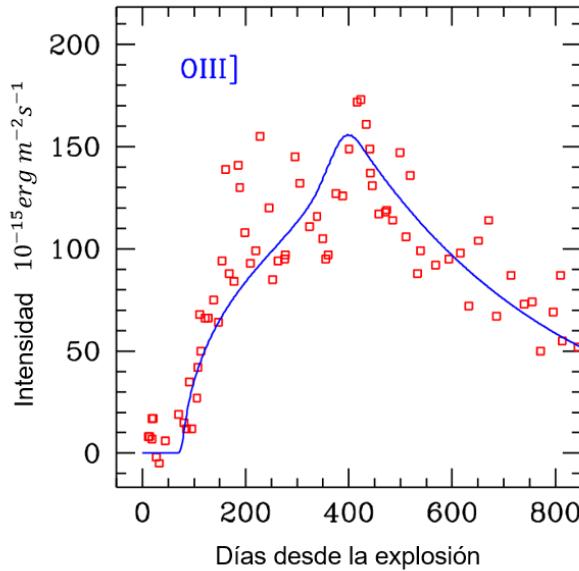
$$d_{LMC} = \frac{R_{SN1987a}}{\tan\left(\frac{\phi_{SN1987a}}{2}\right)} \quad (17)$$

Mediante el uso del software JS9³⁸ se determina el diámetro aparente $\phi_{SN1987a}$ (University, 2023), obteniendo un valor de $\phi_{SN1987a} = 1601.4 \text{ mas}$. Para el valor del radio $R_{SN1987a}$ usamos la relación descrita por Panagia (1999b) en la ecuación 18. Donde t_0 representa el tiempo de inicio de emisión en la banda UV y t_{\max} representa el tiempo en el cual se encuentra el pico de emisión en esta banda. Gracias a Panagia (2003) el cual describe esta curva de luz en la banda UV días después de la explosión en la figura 15.

$$R_{SN1987a} = \frac{c(t_0 + t_{\max})}{2} \quad (18)$$

Figura 15

Curva de luz en la banda UV de la explosión de SN1987a.



Nota. En la figura 15 $R_{SN1988a}$, tomada gracias a la investigación de Panagia (2003), el eje vertical representa la intensidad y el eje horizontal el tiempo después de la explosión en días.

³⁸ Ver apéndice C

Consecuentemente, se obtiene un $R_{SN1988a} = 6.1516 \times 10^{15} \text{ m}$. Luego, se obtiene una distancia de $d_{LMC} = 50.9499 \text{ Kpc}$, como se detalla en la tabla 16.

Tabla 16

Distancia a LMC mediante la SN1987a.

d_{LMC}	Error Estándar	Error Sistemático
Kpc	Kpc	Kpc
50.9499	$\pm \text{N/A}$	± 0.3649

Nota. No se cuenta con un valor de error estándar debido a la presencia de únicamente una muestra, la cual en este caso es SN1987a.

Resultados

Recopilando los 6 métodos previamente descritos sus resultados se sintetizan en la tabla 17. A partir de esta, podemos descartar los métodos que evidencien una desviación considerable. Por lo tanto obtenemos una $d_{LMC} = 50.4802$ Kpc registrado en la tabla 18.

Tabla 17

Métodos usados para determinar la distancia a LMC.

Método	d_{LMC}	Error Estándar	Error Sistemático
	Kpc	Kpc	Kpc
Paralaje	41.2459	± 3.5611	± 0.3991
RR Lyrae	49.9979	± 0.0503	± 0.0481
Cefeidas Clásicas	50.4930	± 0.1411	± 0.0002
Corrimiento al Rojo	294.4632	± 93.9525	± 2.1844
Mecánica Celeste	48.2750	± 0.0922	± 0.1598
SN1987a	50.9499	$\pm \text{N/A}$	± 0.3649

Para el resultado obtenido en la tabla 18 se descartaron los métodos que por su planteamiento, procedimiento, o resultado presentan una desviación significativa respecto al valor aceptado de d_{LMC} . Los métodos descartados fueron: Paralaje, a pesar de tener una distancia relativamente cercana al valor aceptado, debido a que el error estándar presentado es considerable y hay que tener en cuenta el rango de datos de $\pm 0.5\sigma$ que fue usado, en parte, gracias a la gran dispersión que presentan los datos recopilados. El método corrimiento al rojo, se descartó por la gran desviación que presenta respecto a la media obtenida; de igual manera, como se mencionó previamente, hay que tener en cuenta parámetros mecánicos de LMC como su velocidad de rotación e inclinación para obtener un valor de z preciso. El método mecánica celeste, pese a tener un valor desviado únicamente por ≈ 2 Kpc, se debe considerar la falta de literatura correspondiente a los parámetros

orbitales de LMC, en cuanto a su periodo orbital o excentricidad.

Tabla 18

Resultado Distancia a LMC

d_{LMC}	Error Estándar	Error Sistemático
Kpc	Kpc	Kpc
50.4802	± 0.0638	± 0.1377

Discusión

Teniendo en cuenta lo presentado en la figura 2, podemos ubicar nuestro valor determinado y se evidencia que sigue la tendencia de un valor cercano a los 50 Kpc. Asimismo, se descartó el método de paralaje, esto concuerda con lo planteado por Reiche (2022) donde vemos que el método de paralaje únicamente es efectivo para estrellas cercanas; sumado a la incertidumbre de *mas* brindada por GAIA de acuerdo a la magnitud de la estrella se acerca a $\approx 20mag$.

El resultado obtenido concuerda con el valor que es tomado como d_{LMC} de referencia, proporcionado por la extensa trayectoria de la investigación y refinamiento del procedimiento de Pietrzynski, G. et al. (2013), mediante el uso de OGLE-III y binarias eclipsantes. Se destaca el uso del JWST y sus instrumentos de *NIRSpec* y *MIRI*, de los cuales espectros en 5 zonas de LMC fueron recopilados; donde finalmente, el método de corrimiento al rojo fue descartado por múltiples razones, entre ellas el valor cambiante de H_0 , el cual, en esta investigación se usó el proporcionado por Riess et al. (2023) quien hizo uso de JWST para calibrar este parámetro. En el futuro, se espera que nuevos proyectos como el ELT, de la ESO, con un poder de resolución mayor permitan determinar distancias mediante métodos geométricos los cuales pueden llegar a ofrecer mayor precisión y ampliar la escala en la cual el paralaje sigue siendo efectivo.

Conclusiones

En este proyecto la distancia a la Gran Nube de Magallanes se determinó mediante el uso de seis métodos: paralaje, variables RR Lyrae, variables cefeidas clásicas, corrimiento al rojo, mecánica celeste y la supernova SN1987a.

Para cada método empleado se calculó el error estándar y error sistemático los cuales se encuentran registrados en la tabla 17. De estos parámetros, se destaca el error estándar del método de paralaje; así como, el error estándar y sistemático del método de corrimiento al rojo. Estos presentan un valor elevado por su propio planteamiento; en el caso del paralaje, este error se debe a la gran dispersión de datos que se presentó, razón por la cual se tuvo que recortar el registro de estrellas a únicamente $\pm 0.5\sigma$. Al hablar del método de corrimiento al rojo, se sugiere que los valores de z registrados están desviados de su valor actual al no tener en cuenta parámetros mecánicos de LMC; al tener en cuenta estos datos se presentaría un problema recurrente en el cual la distancia es indispensable para determinar la velocidad de rotación en la posición de la estrella que se está tratando de registrar.

Asimismo, en la tabla 17, obtenemos d_{LMC} mediante los seis métodos descritos. Se observa que los métodos empleados se acercan formando un promedio de aproximadamente 48 Kpc; teniendo en cuenta únicamente el valor de d_{LMC} se descarta la distancia mediante el método de corrimiento al rojo, la cual se aleja de esta media por más de 240 Kpc.

Finalmente, al comparar cada método empleado para determinar la distancia a LMC, se observa que los métodos de paralaje y corrimiento al rojo presentan un valor elevado en su error estándar; igualmente, los valores de d_{LMC} obtenidos, descartando el valor mediante el método de corrimiento al rojo, presentan una desviación estándar de $\sigma =$

3.5893 Kpc, estando relativamente cercanos. Por ende, se recomienda el uso combinado de los métodos de estrellas variables: RR Lyrae o cefeidas clásicas, o supernovas para determinar distancias a cuerpos celestes en el grupo local; teniendo en cuenta que presentan una gran precisión y en el caso de LMC y SMC se cuenta con un gran registro de la región, lo cual se traduce en una gran disponibilidad de datos. De este modo, se puede complementar cada método, reduciendo sus incertidumbres y obteniendo un valor con mayor precisión; ya sea por la propia morfología de la galaxia y la distribución de estrellas variables, o por el registro de distintas supernovas en la misma.

Por consiguiente, se determina la distancia a LMC, $d_{LMC} = 50.4802$, haciendo uso de variables RR Lyrae, cefeidas clásicas y la supernova SN1987a. Este valor se encuentra a $+0.5102$ Kpc del valor aceptado de esta distancia, obtenido por Pietrzyński (2014) mediante el uso de EBs con un valor de $d_{LMC} = 49.97$ Kpc y una incertidumbre del 2 %.

Teniendo en cuenta que OGLE-IV y JWST en el futuro próximo se realizarán capturas y recolección de datos en esta región de interés; se podrá dar la continuidad a este proyecto de investigación permitiendo una expansión en la recopilación de datos para una mayor precisión en las diferentes variables que sean analizadas en esta región.

Disponibilidad de Datos

Los datos de distancias y datos observacionales fueron citados anteriormente. Asimismo, de acuerdo con las sugerencias planteadas por Chen et al. (2022) se dispone de los datos necesarios para recrear las tablas y figuras disponibles en el repositorio <https://github.com/JuanJS01/DistanceToLMC>.

Disponibilidad del Código

El análisis de esta investigación fue realizada en Python 3.9.13 y hace uso de librerías de código abierto, incluyendo a Numpy 1.26.1, Astropy 5.3.4; Astroquery 0.4.6; Matplotlib 3.8.0. Del mismo modo, se hizo uso del software JS9 (University, 2023)., Stellarium (Zotti et al., 2021). y Jdaviz (STScI, 2023). El acceso completo al código y scripts usados estan disponibles en el repositorio <https://github.com/JuanJS01/DistanceToLMC>.

Referencias

- Abuter, R., Amorim, A., Baubòck, M., Berger, J. P., Bonnet, H., Brandner, W., Clénet, Y., du Foresto, V. C., de Zeeuw, P. T., Dexter, J., Duvert, G., Eckart, A., Eisenhauer, F., Schreiber, N. M. F., Garcia, P., Gao, F., Gendron, E., Genzel, R., Gerhard, O., ... Yazici, S. (2019). A geometric distance measurement to the Galactic center black hole with 0.3 % uncertainty. *Astronomy & Astrophysics*, 625, L10. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935656>
- Alves, D. R. (2004a). A review of the distance and structure of the Large Magellanic Cloud [Extragalactic Binaries]. *New Astronomy Reviews*, 48(9), 659-665.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.newar.2004.03.001>
- Alves, D. R. (2004b). A review of the distance and structure of the Large Magellanic Cloud. *New Astronomy Reviews*, 48(9), 659-665.
<https://doi.org/10.1016/j.newar.2004.03.001>
- Alves, D. R. (2005). A Review of the Distance and Structure of the Large Magellanic Cloud. *Highlights of Astronomy*, 13, 448-449.
<https://doi.org/10.1017/S1539299600016166>
- Association, B. A. (2012). *Eclipsing Binary Observing Guide* (1.^a ed., Vol. 1).
<https://britastro.org/vss/EBHandbook11.pdf>
- Bergh, S. (1999). The local group of galaxies. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 9(3), 273-318. <https://doi.org/10.1007/s001590050019>
- Bing-Qiu, C., Bi-Wei1, J., & Ming, Y. (2013). Analysis of a selected sample of RR Lyrae stars in the LMC from OGLE-III. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 13(3), 290. <https://doi.org/10.1088/1674-4527/13/3/005>
- Blakeslee, J. P., Jensen, J. B., Ma, C.-P., Milne, P. A., & Greene, J. E. (2021). The Hubble Constant from Infrared Surface Brightness Fluctuation Distances. *The Astrophysical Journal*, 911(1), 65. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abe86a>

- Bovill, M. S., & Ricotti, M. (2011). Where Are The Fossils Of The First Galaxies? Ii. True Fossils, Ghost Halos, And The Missing Bright Satellites. *The Astrophysical Journal*, 741(1), 18. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/741/1/18>
- Brescher, S. S. (2023). Mapping the Universe to Discover Its Past. *Office of Science*.
<https://www.energy.gov/science/articles/mapping-universe-discover-its-past>
- Catelan, M., Pritzl, B. J., & Smith, H. A. (2004). The RR Lyrae Period-Luminosity Relation. I. Theoretical Calibration. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 154(2), 633. <https://doi.org/10.1086/422916>
- Cautun, M., Deason, A. J., Frenk, C. S., & McAlpine, S. (2018). The aftermath of the Great Collision between our Galaxy and the Large Magellanic Cloud. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 483(2), 2185-2196.
<https://doi.org/10.1093/mnras/sty3084>
- Chen, T. X., Schmitz, M., Mazzarella, J. M., Wu, X., van Eyken, J. C., Accomazzi, A., Akeson, R. L., Allen, M., Beaton, R., Berriman, G. B., Boyle, A. W., Brouty, M., Chan, B. H. P., Christiansen, J. L., Ciardi, D. R., Cook, D., D'Abrusco, R., Ebert, R., Frayer, C., ... Wang, S.-Y. (2022). Best Practices for Data Publication in the Astronomical Literature. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 260(1), 5. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac6268>
- Chiosi, C., & Pigatto, L. (1986). The Distance Modulus of the Large Magellanic Cloud., 308, 1. <https://doi.org/10.1086/164473>
- Choudhury, S., de Grijs, R., Bekki, K., Cioni, M.-R. L., Ivanov, V. D., van Loon, J. T., Miller, A. E., Niederhofer, F., Oliveira, J. M., Ripepi, V., Sun, N.-C., & Subramanian, S. (2021). The VMC survey – XLIV: mapping metallicity trends in the large magellanic cloud using near-infrared passbands. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 507(4), 4752-4763.
<https://doi.org/10.1093/mnras/stab2446>

- Clementini, G., Gratton, R., Bragaglia, A., Carretta, E., Fabrizio, L. D., & Maio, M. (2003). Distance to the Large Magellanic Cloud: The RR Lyrae Stars*. *The Astronomical Journal*, 125(3), 1309. <https://doi.org/10.1086/367773>
- Croswell, K. (2021). Astronomers are redrawing our corner of the Milky Way. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(40).
<https://doi.org/10.1073/pnas.2116185118>
- de Bruijne, J. H. J., Abreu, A., Brown, A. G. A., Castañeda, J., Cheek, N., Crowley, C., De Angeli, F., Drimmel, R., Fabricius, C., Fleitas, J., Gracia-Abril, G., Guerra, R., Hutton, A., Messineo, R., Mora, A., Nienartowicz, K., Panem, C., & Siddiqui, H. (2018, julio). Gaia DR2 documentation Chapter 1: Introduction.
- Deb, S., Ngeow, C.-C., Kanbur, S. M., Singh, H. P., Wysocki, D., & Kumar, S. (2018). Geometry of the Large Magellanic Cloud using multiwavelength photometry of classical Cepheids. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 478(2), 2526-2540. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty1124>
- Erkal, D., Belokurov, V., Laporte, C. F. P., Koposov, S. E., Li, T. S., Grillmair, C. J., Kallivayalil, N., Price-Whelan, A. M., Evans, N. W., Hawkins, K., Hendel, D., Mateu, C., Navarro, J. F., del Pino, A., Slater, C. T., Sohn, S. T., & Collaboration), (O. O. A. T. (2019). The total mass of the Large Magellanic Cloud from its perturbation on the Orphan stream. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 487(2), 2685-2700. <https://doi.org/10.1093/mnras/stz1371>
- ESA. (2019, septiembre). A HISTORY OF ASTROMETRY - PART II TELESCOPE IGNITES THE RACE TO MEASURE STELLAR DISTANCES.
<https://sci.esa.int/web/gaia/-/53197-seeing-and-measuring-farther>
- ESO. (2019, septiembre). *VISTA desvela una nueva imagen de la Gran Nube de Magallanes*. <https://www.eso.org/public/spain/news/eso1914/>
- Eyer, L., Guy, L., Distefano, E., Clementini, G., Mowlavi, N., Rimoldini, L., Roelens, M., Audard, M., Holl, B., Lanzafame, A., Lebzelter, T., Lecoeur-Taïbi, I., Molnár, L.,

- Ripepi, V., Sarro, L., Jevardat de Fombelle, G., Nienartowicz, K., De Ridder, J., Juhász, Á., ... Regibo, S. (2018, julio). Gaia DR2 documentation Chapter 7: Variability.
- Freedman, W. L., Madore, B. F., Hatt, D., Hoyt, T. J., Jang, I. S., Beaton, R. L., Burns, C. R., Lee, M. G., Monson, A. J., Neeley, J. R., Phillips, M. M., Rich, J. A., & Seibert, M. (2019). The Carnegie-Chicago Hubble Program. VIII. An Independent Determination of the Hubble Constant Based on the Tip of the Red Giant Branch*. *The Astrophysical Journal*, 882(1), 34. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab2f73>
- Freedman, W. L., Madore, B. F., Scowcroft, V., Burns, C., Monson, A., Persson, S. E., Seibert, M., & Rigby, J. (2012). CARNEGIE HUBBLE PROGRAM: A MID-INFRARED CALIBRATION OF THE HUBBLE CONSTANT. *The Astrophysical Journal*, 758(1), 24. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/758/1/24>
- Gardner, J. P., Mather, J. C., Clampin, M., Doyon, R., Greenhouse, M. A., Hammel, H. B., Hutchings, J. B., Jakobsen, P., Lilly, S. J., Long, K. S., Lunine, J. I., Mccaughrean, M. J., Mountain, M., Nella, J., Rieke, G. H., Rieke, M. J., Rix, H.-W., Smith, E. P., Sonneborn, G., ... Wright, G. S. (2006). The James Webb Space Telescope. *Space Science Reviews*, 123(4), 485-606. <https://doi.org/10.1007/s11214-006-8315-7>
- Gerhard, O. (2002). Mass distribution in our Galaxy. *Space Science Reviews*, 100(1), 129-138. <https://doi.org/10.1023/A:1015818111633>
- Gleason, J. (2018, noviembre). *LMC Spiral Structure Revealed in Hydrogen Alpha*. <https://www.astrobin.com/374782/>
- Graczyk, D., Soszyński, I., Poleski, R., Pietrzyński, G., Udalski, A., Szymański, M. K., Kubiak, M., Wyrzykowski, Ł., & Ulaczyk, K. (2011). The Optical Gravitational Lensing Experiment. The OGLE-III Catalog of Variable Stars. XII. Eclipsing Binary Stars in the Large Magellanic Cloud. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1108.0446>

- Graczyk, D., Pietrzynski, G., Galan, C., Gieren, W., Tkachenko, A., Anderson, R. I., Gallenne, A., Gorski, M., Hajdu, G., Kaluszynski, M., Karczmarek, P., Kervella, P., Maxted, P. F. L., Nardetto, N., Narloch, W., Pavlovski, K., Pilecki, B., Pych, W., Southworth, J., ... Konorski, P. (2021). The surface brightness-colour relations based on eclipsing binary stars and calibrated with Gaia EDR3. *AA*, *649*, A109. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140571>
- Hobbs, D., Clotet, M., Castañeda, J., Fabricius, C., Bastian, U., Portell, J., Smart, R., Davidson, M., Lindegren, L., Hambly, N., Mora, A., Biermann, M., Löffler, W., Brown, A. G. A., Busonero, D., & Riva, A. (2018, julio). Gaia DR2 documentation Chapter 2: Astrometric and photometric pre-processing.
- Hobbs, D., Lindegren, L., Bastian, U., Klioner, S., Butkevich, A., Stephenson, C., Hernandez, J., Lammers, U., Bombrun, A., Mignard, F., Altmann, M., Davidson, M., de Bruijne, J. H. J., Fernández-Hernández, J., Siddiqui, H., & Utrilla Molina, E. (2018, julio). Gaia DR2 documentation Chapter 3: Astrometry.
- Imara, N., & Blitz, L. (2007). Extinction in the Large Magellanic Cloud. *The Astrophysical Journal*, *662*(2), 969. <https://doi.org/10.1086/517911>
- Kopal, Z. (2013). *Advances in Astronomy and Astrophysics*. Elsevier Science. <https://books.google.es/books?id=rr43BQAAQBAJ>
- Kovacs, G. (2000). The distance modulus of the Large Magellanic Cloud based on double-mode RR Lyrae stars.
- Leavitt, H. S., & Pickering, E. C. (1912). Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic cloud. *Harvard College Observatory Circular*, *173*, 1-3.
- Luri, X., Brown, A. G. A., Sarro, L. M., Arenou, F., Bailer-Jones, C. A. L., Castro-Ginard, A., de Bruijne, J., Prusti, T., Babusiaux, C. & Delgado, H. E. (2018). Gaia Data Release 2 - Using Gaia parallaxes. *AA*, *616*, A9. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832964>

- Madore, B. F., Freedman, W. L., & Moak, S. (2017). A Method for Improving Galactic Cepheid Reddenings and Distances. *The Astrophysical Journal*, 842(1), 42. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa6e4d>
- María M., V. (2010). El nacimiento de la astronomía antigua. Estabilizaciones y desestabilizaciones culturales. *Gazeta de Antropología*, 26(2). <http://hdl.handle.net/10481/6768>
- McCall, M. L. (1993). The Distance to the Large Magellanic Cloud from SN 1987A. *apjl*, 417, L75. <https://doi.org/10.1086/187098>
- Menzel, D. H. (1922). Distribution of Two Thousand New Nebulae, and Distance of the Large Magellanic Cloud. *Publications of the American Astronomical Society*, 4, 374.
- München, U.-S. (1999, enero). *Extragalaktische Entfernungsbestimmung durch Cepheiden*. <https://www.usm.uni-muenchen.de/people/saglia/praktikum/distances/entfernungen.html>
- NASA. (2020). *Cosmic Distances*. <https://science.nasa.gov/solar-system/cosmic-distances/>
- NASA. (2021a, enero). *About Webb Space Telescope*. <https://webb.nasa.gov/content/about/index.html>
- NASA. (2021b, enero). *Instruments: MIRI*. <https://webb.nasa.gov/content/observatory/instruments/nirspec.html>
- NASA. (2021c, enero). *Instruments: NIRSpec*. <https://webb.nasa.gov/content/observatory/instruments/nirspec.html>
- NED. (2023). NASA/IPAC Extragalactic Database. *Results for Large Magellanic Cloud*. Retrieved 31 October 2023.
- Newton, I. (1687). *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Jussu Societatis Regiæ.
- Ngeow, C.-C. (2012). ON THE APPLICATION OF WESENHEIT FUNCTION IN DERIVING DISTANCE TO GALACTIC CEPHEIDS. *The Astrophysical Journal*, 747(1), 50. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/747/1/50>

- Nicolaus, C. (1965). *De revolutionibus orbium coelestium / Nicolaus Copernicus*. New York: Johnson Reprint Corporation.
- Overbye, D. (2020). A Star Went Supernova in 1987. Where Is It Now? *The New York Times*.
- P. Ingrid, M. (2011). *La gran nube de Magallanes: historia de la formación estelar, estructura y evolución* [Tesis doctoral, Universidad de La Laguna].
<http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/21154>
- Panagia, N. (1999a, enero). Distance to SN 1987 A and the LMC. En Y. .-. Chu, N. Suntzeff, J. Hesser & D. Bohlender (Eds.), *New Views of the Magellanic Clouds* (p. 549, Vol. 190).
- Panagia, N. (1999b, enero). Distance to SN 1987 A and the LMC. En Y. .-. Chu, N. Suntzeff, J. Hesser & D. Bohlender (Eds.), *New Views of the Magellanic Clouds* (p. 549, Vol. 190).
- Panagia, N. (2003). A Geometric Determination of the Distance to SN 1987A and the LMC. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.ASTRO-PH/0309416>
- Pietrzyński, G. (2014, diciembre). *Precise and accurate distance determination to the LMC and SMC*. Polskie Towarzystwo Astronomiczne.
<https://www.pta.edu.pl/pliki/proc/36pta/v1p34.pdf>
- Pietrzynski, G., Graczyk, D., Gieren, W., Thompson, I., Soszynski, I., Pilecki, B., Storm, J., Konorski, P., Suchomska, K., Gallenne, A., Nardetto, N., Karczmarek, P. & Gorski, M. (2013). The Araucaria Project: Precise and accurate distance determination to the LMC and SMC. *EAS Publications Series*, 64, 305-307.
<https://doi.org/10.1051/eas/1364042>
- Racca, G. D., Laureijs, R., Stagnaro, L., Salvignol, J.-C., Alvarez, J. L., Criado, G. S., Venancio, L. G., Short, A., Strada, P., Bönke, T., Colombo, C., Calvi, A., Maiorano, E., Piersanti, O., Prezelus, S., Rosato, P., Pinel, J., Rozemeijer, H., Lesna, V., . . . Schmidt, M. (2016). The Euclid mission design. En H. A. MacEwen,

- G. G. Fazio, M. Lystrup, N. Batalha, N. Siegler & E. C. Tong (Eds.), *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Optical, Infrared, and Millimeter Wave* (99040O, Vol. 9904). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2230762>
- Reiche, L. (2022). Cosmic Distance Measurements (22.^a ed.). *Your passion for Physics*, 21. https://uebungen.physik.uni-heidelberg.de/c/image/d/vorlesung/20212/1388/material/2022-02-01--Writeup--Cosmic_distance_measurements--Leopold_Reiche.pdf
- Riess, A. G., Anand, G. S., Yuan, W., Casertano, S., Dolphin, A., Macri, L. M., Breuval, L., Scolnic, D., Perrin, M., & Anderson, R. I. (2023). Crowded No More: The Accuracy of the Hubble Constant Tested with High-resolution Observations of Cepheids by JWST. *The Astrophysical Journal Letters*, 956(1), L18. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/acf769>
- Russell, J. L. (1964). Kepler's Laws of Planetary Motion: 1609-1666. *The British Journal for the History of Science*, 2(1), 1-24. Consultado el 8 de noviembre de 2023, desde <http://www.jstor.org/stable/4025081>
- Salgado, J., González-Núñez, J., Gutiérrez-Sánchez, R., Carlos Segovia, J., Durán, J., Racero, E., & Mora, A. (2018, julio). Gaia DR2 documentation Chapter 13: Construction of the archive.
- Sanchez, J. (2023). Datos LMC usando el JWST para el cálculo de corrimiento al rojo. <https://doi.org/10.17909/T7V3-Y451>
- Sawala, T., Cautun, M., Frenk, C., Helly, J., Jasche, J., Jenkins, A., Johansson, P. H., Lavaux, G., McAlpine, S., & Schaller, M. (2023). The Milky Way's plane of satellites is consistent with Λ CDM. *Nature Astronomy*, 7(4), 481-491. <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01856-z>
- Schaefer, B. E. (2007). A PROBLEM WITH THE CLUSTERING OF RECENT MEASURES OF THE DISTANCE TO THE LARGE MAGELLANIC CLOUD. *The Astronomical Journal*, 135(1), 112. <https://doi.org/10.1088/0004-6256/135/1/112>

- Schöller, M. (2007). The Very Large Telescope Interferometer: Current facility and prospects [Observation and Data Reduction with the VLT Interferometer]. *New Astronomy Reviews*, 51(8), 628-638.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.newar.2007.06.008>
- Shapley, H. (1924). The Magellanic Clouds, III. The Distance and Linear Dimensions of the Large Cloud. *Harvard College Observatory Circular*, 268, 1-4.
- Shapley, H. (1953). Magellanic Clouds. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 39(12), 1161-1168. <https://doi.org/10.1073/pnas.39.12.1161>
- Shapley, H., & Nail, V. M. (1955). THE MAGELLANIC CLOUDS. XIV. THE BAR OF THE LARGE CLOUD. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 41(4), 185-190. <https://doi.org/10.1073/pnas.41.4.185>
- SIMBAD. (2023). Set of Identifications, Measurements and Bibliography for Astronomical Data. *vSIMBAD4 1.8-2022-03 (Strasbourg: Centre de Données de Strasbourg)*.
- Slawik, E. (2004, junio). *The Large Magellanic Cloud*. ESA.
<https://sci.esa.int/web/hubble/-/35521-the-large-magellanic-cloud>
- Soszynski, I., Poleski, R., Udalski, A., Szymanski, M. K., Kubiak, M., Pietrzynski, G., Wyrzykowski, L., Szewczyk, O., & Ulaczyk, K. (2008). The Optical Gravitational Lensing Experiment. The OGLE-III Catalog of Variable Stars. I. Classical Cepheids in the Large Magellanic Cloud. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.0808.2210>
- Soszynski, I., Udalski, A., Szymanski, M. K., Kubiak, M., Pietrzynski, G., Wyrzykowski, L., Szewczyk, O., Ulaczyk, K., & Poleski, R. (2009). The Optical Gravitational Lensing Experiment. The OGLE-III Catalog of Variable Stars. III. RR Lyrae Stars in the Large Magellanic Cloud.
- Soszyński, I., & OGLE. (2018, junio). *Type II Cepheids*.
https://ogle.astrouw.edu.pl/atlas/type_II_Cepheids.html
- STScI. (2023). *Mikulski Archive for Space Telescopes*.
<https://mast.stsci.edu/portal/Mashup/Clients/Mast/Portal.html>

- Team, O. (2022, enero). *The Optical Gravitational Lensing Experiment.*
<https://ogle.astrouw.edu.pl/>
- Thabet, M. (2013). Measuring Distances in Space. *SSRN Electronic Journal*, 28.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.2355164>
- University, H. (2023). JS9 Software. *Center for Astrophysics*.
- Utrilla Molina, E., & Hutton, A. (2018, julio). Gaia DR2 documentation Chapter 9:
Catalogue consolidation.
- Van der Marel, R. P., Alves, D. R., Hardy, E., & Suntzeff, N. B. (2002). New
Understanding of Large Magellanic Cloud Structure, Dynamics, and Orbit from
Carbon Star Kinematics. *AJ*, 124(5), 2639-2663. <https://doi.org/10.1086/343775>
- van Leeuwen, F., de Bruijne, J. H. J., Arenou, F., Bakker, J., Blomme, R., Busso, G.,
Cacciari, C., Castañeda, J., Cellino, A., Clotet, M., Comoretto, G., Eyer, L.,
González-Núñez, J., Guy, L., Hambly, N., Hobbs, D., van Leeuwen, M., Luri, X.,
Manteiga, M., ... Voutsinas, S. (2018, julio). Gaia DR2 documentation.
- Vernin, J., Muñoz-Tuñón, C., Sarazin, M., Ramió, H. V., Varela, A. M., Trinquet, H.,
Delgado, J. M., Fuensalida, J. J., Reyes, M., Benhida, A., Benkhaldoun, Z.,
Lambas, D. G., Hach, Y., Lazrek, M., Lombardi, G., Navarrete, J., Recabarren, P.,
Renzi, V., Sabil, M., & Vrech, R. (2011). European Extremely Large Telescope Site
Characterization I: Overview. *Publications of the Astronomical Society of the
Pacific*, 123(909), 1334. <https://doi.org/10.1086/662995>
- Weisskopf, M. C., Brinkman, B., Canizares, C., Garmire, G., Murray, S., &
Speybroeck, L. P. V. (2002). An Overview of the Performance and Scientific Results
from the Chandra X-Ray Observatory. *Publications of the Astronomical Society of
the Pacific*, 114(791), 1. <https://doi.org/10.1086/338108>
- Wilson, R. E. (1924). On the distance of the large Magellanic cloud. *The Astronomical
Journal*, 35, 183-184.

- Wilson, R. E. (1918). The Radial Velocity of the Greater Magellanic Cloud. *Publications of Lick Observatory*, 13, 186-190.
- Wyrzykowski, L., Udalski, A., Kubiak, M., Szymanski, M., Zebrun, K., Soszynski, I., Wozniak, P. R., Pietrzynski, G., & Szewczyk, O. (2003). The Optical Gravitational Lensing Experiment. Eclipsing Binary Stars in the Large Magellanic Cloud. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.ASTRO-PH/0304458>
- Xu, Y., Hao, C. J., Liu, D. J., Lin, Z. H., Bian, S. B., Hou, L. G., Li, J. J., & Li, Y. J. (2023). What Does the Milky Way Look Like? *The Astrophysical Journal*, 947(2), 54. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/acc45c>
- Zotti, G., Hoffmann, S. M., Wolf, A., Chéreau, F., & Chéreau, G. (2021). The Simulated Sky: Stellarium for Cultural Astronomy Research. *Journal of Skyscape Archaeology*, 6(2), 221-258. <https://doi.org/10.1558/jsa.17822>

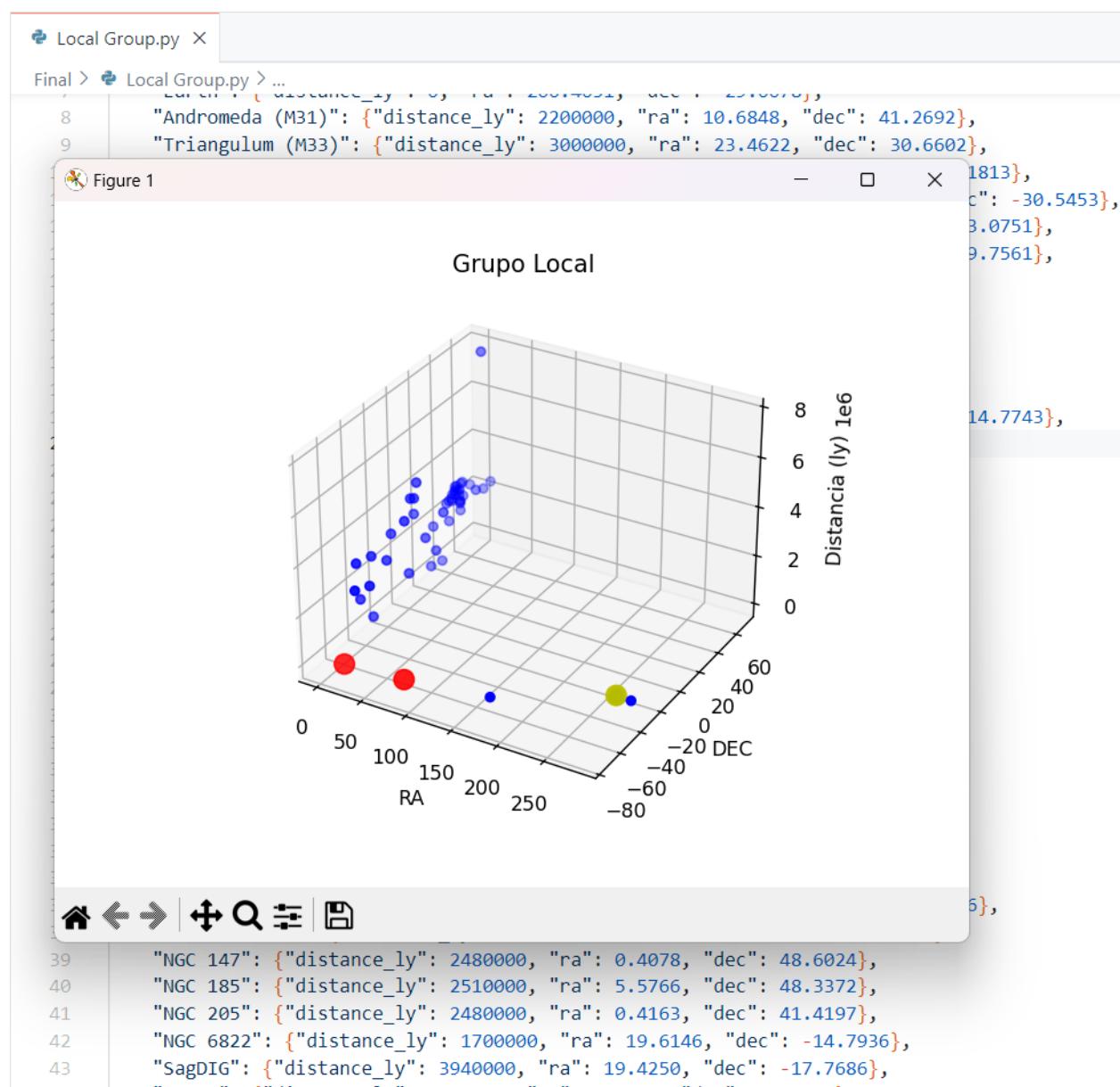
Apéndices

A continuación se presentan los apéndices anteriormente mencionados en el texto.

Apéndice A

```
Local Group.py • Local Group.py > ...
1 import matplotlib.pyplot as plt
2 from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
3
4 # Diccionario de Estrellas
5 stars = {
6     "Milky Way": {"distance_ly": 26600, "ra": 266.4051, "dec": -29.0078},
7     "Earth": {"distance_ly": 0, "ra": 266.4051, "dec": -29.0078},
8     "Andromeda (M31)": {"distance_ly": 2200000, "ra": 10.6848, "dec": 41.2692},
9     "Triangulum (M33)": {"distance_ly": 3000000, "ra": 23.4622, "dec": 30.6602},
10    "The Milky Way Dwarf": {"distance_ly": 260000, "ra": 170.0965, "dec": -64.1813},
11    "Sagittarius Dwarf Elliptical": {"distance_ly": 80000, "ra": 283.8329, "dec": -30.5453},
12    "Small Magellanic Cloud": {"distance_ly": 200000, "ra": 18.8988, "dec": -73.0751},
13    "Large Magellanic Cloud": {"distance_ly": 163000, "ra": 81.8951, "dec": -69.7561},
14 }
15
16 # Plot 3D
17 fig = plt.figure()
18 ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
19
20 # Ra y dec
21 ra = [star["ra"] for star in stars.values()]
22 dec = [star["dec"] for star in stars.values()]
23 dist = [star["distance_ly"] for star in stars.values()]
24
25 # Plot 3d
26 colors = []
27 sizes = []
28 highlighted_stars = ["Small Magellanic Cloud", "Large Magellanic Cloud"]
29 mkwy = ["Milky Way"]
30 eth = ["Earth"]
31
32 for star_name in stars:
33     if star_name in highlighted_stars:
34         colors.append('r')
35         sizes.append(100)
36     else:
37         if star_name in mkwy:
```

```
Local Group.py •
Local Group.py > ...
31  for star_name in stars:
32      if star_name in highlighted_stars:
33          colors.append('r')
34          sizes.append(100)
35      else:
36          if star_name in mkwy:
37              colors.append('y')
38              sizes.append(100)
39          else:
40              if star_name in eth:
41                  colors.append('g')
42                  sizes.append(50)
43              else:
44                  colors.append('b')
45                  sizes.append(20)
46
47
48
49 ax.scatter(ra, dec, dist, c=colors, s=sizes)
50
51 # Titulos
52 ax.set_xlabel('RA')
53 ax.set_ylabel('DEC')
54 ax.set_zlabel('Distancia (ly)')
55 plt.title('Grupo Local')
56
57 # Show
58 plt.show()
59
```



Apéndice B



```


1  from astroquery.gaia import Gaia
2  import numpy as np
3
4  # Centro de la región
5  ra_lmc = 80.893
6  dec_lmc = -69.756
7
8  # Estrellas a la redonda
9  query = f"""
10    SELECT TOP 1000000
11      source_id, ra, dec, parallax, pmra, pmdec, phot_g_mean_mag
12    FROM gaiadr2.gaia_source
13   WHERE 1=CONTAINS(POINT('ICRS', gaiadr2.gaia_source.ra, gaiadr2.gaia_source.dec),
14      CIRCLE('ICRS', {ra_lmc}, {dec_lmc}, 15.0))
15 ...
16 job = Gaia.launch_job(query)
17 result = job.get_results()
18
19 # CSV
20 result.write('Estrellas_GAIA5.csv', overwrite=True)
21
22

```

Apéndice C

