

ACTIVIDAD #5: COSMÓLOGOS POR UN DÍA. DETERMINANDO EL VALOR DE H_0 USANDO SUPERNOVAS TIPO IA

FECHA DE ENTREGA: 01 DE DICIEMBRE DEL 2025

Las supernovas (SNs) son explosiones energéticas de estrellas en las últimas etapas de su vida. Se clasifican en dos tipos generales: las de colapso de núcleo (producidas por estrellas de alta masa) y las de colapso termonuclear o Tipo Ia.

Observaciones detalladas de SNs han sido cruciales para el descubrimiento de la expansión acelerada del universo, la comprensión de la formación de elementos pesados y la estimación de distancias a galaxias lejanas. El hecho de por qué las supernovas Tipo Ia pueden ser usadas como candelas estándar para medir distancias se debe a que, al ser producidas por el mismo mecanismo de explosión termonuclear al alcanzar la Masa de Chandrasekhar ($1.4M_{\odot}$), poseen una luminosidad intrínseca muy similar (Howell, 2011). Este brillo aparente se mide a través de curvas de luz, que muestran la variación del brillo en función del tiempo.

Al obtener el punto máximo de brillo en la curva de luz de una supernova Tipo Ia y el redshift de su galaxia anfitriona, es posible calcular la distancia a la supernova y, a partir de una muestra significativa, estimar la constante de Hubble (H_0) usando la relación distancia-luminosidad.

El volumen de datos generado por surveys como el Zwicky Transient Facility (ZTF) y el futuro Vera C. Rubin Observatory (LSST) hace indispensable el uso de técnicas de Machine Learning para la clasificación. Para esto fue creado ALeRCE (Automatic Learning for the Rapid Classification of Events), un broker astronómico chileno (Förster et al., 2021).

1. Objetivos

- Familiarizarse con la herramienta Explorer de ALeRCE para la selección y el análisis de curvas de luz de supernovas tipo Ia obtenidas por el ZTF.
- Determinar el brillo máximo aparente (m_{\max}) y el redshift (z) de una muestra de supernovas como parámetros de entrada para la medición de distancia.
- Aplicar el módulo de distancia para calcular la distancia de luminosidad (d_L) de cada supernova, utilizando las SNsIa como candelas estándar con una magnitud absoluta conocida (M).
- Realizar una regresión lineal entre la velocidad de recesión (v) y la distancia de luminosidad (d_L) para estimar el valor de la Constante de Hubble (H_0) y su incertidumbre.
- Comparar el método y los resultados obtenidos con el trabajo original de Hubble (1929) para entender la evolución de las escalas de distancia cosmológica.

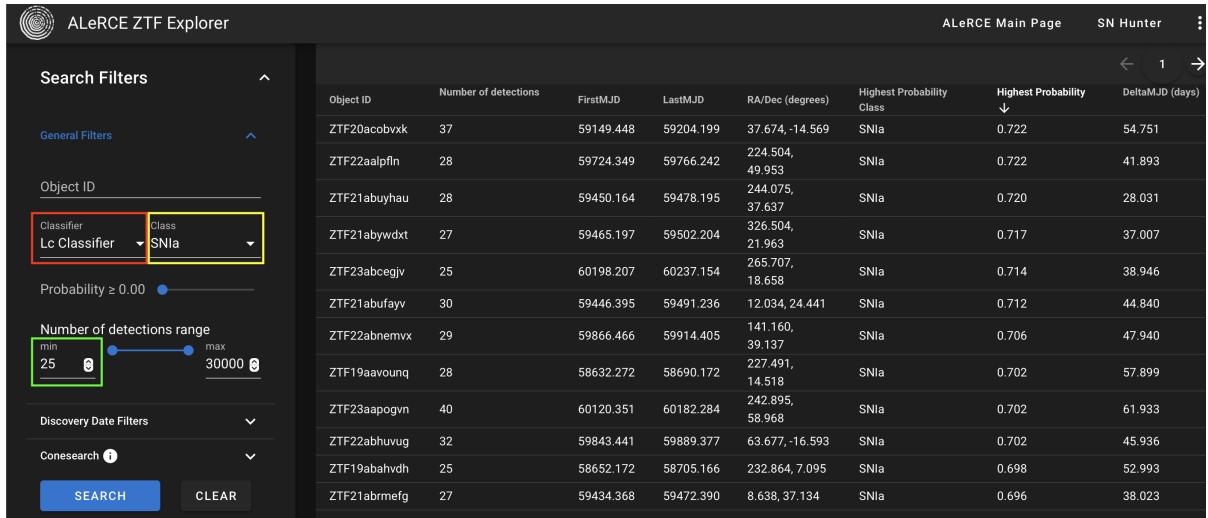


Figura 1: Selección de clasificador, clase y número mínimo de detecciones en ALeRCE Explorer.

- Discutir las fuentes de error (aleatorias y sistemáticas) en la estimación de H_0 y su impacto en la precisión del resultado.

2. Procedimiento

Primero comience ingresando al Explorer de ALeRCE a través del siguiente enlace: <https://alerce.online/>. En la opción de selección de *Classifier*, seleccione Lc Classifier (Sánchez-Sáez et al., 2021) y en la opción de *Class* seleccione SNIA. Para tener un buen muestreo de la curva de luz, puede establecer el número mínimo de detecciones en 25. Finalmente, como el clasificador funciona a partir de una selección de probabilidades, asegúrese de ordenar los resultados por la columna **Highest Probability** en orden descendente (de mayor a menor probabilidad). Todo lo anterior como se observa en la figura 1.

De este grupo de resultados obtenidos anteriormente, seleccione una muestra de al menos 10 supernovas tipo Ia y complete la siguiente tabla 1 con el **Object ID**, el número de detecciones y la probabilidad más alta que le asignó el clasificador a cada una de ellas.:

Seleccionada cualquiera de las anteriores supernovas analizaremos sus curvas de luz. La curva de luz obtenida se muestra en la figura 2. Las curvas de luz obtenidas por el telescopio ZTF están en dos filtros: *g* (puntos verdes) y *r* (puntos rojos). Para esta actividad no nos interesa la fotometría forzada, por lo que podemos desactivar las fechas que se encuentran encerradas en el recuadro rojo de la imagen. Adicionalmente, el *ALeRCE Explorer* nos entrega información adicional sobre la supernova y su galaxia anfitriona, como el *redshift* (*z*), su clasificación espectral y el nombre asignado por el IAU (International Astronomical Union), encerrado en el recuadro naranja de la imagen.

Procedemos ahora a trabajar con la curva de luz. Intente identificar el punto máximo de brillo aparente ($m_{g,\max}$ y $m_{r,\max}$) en la curva de luz, tanto en el filtro *g* como en el *r*. El *ALeRCE Explorer* permite realizar esta medición de forma interactiva al posicionar el cursor sobre el punto máximo de la curva, como se puede ver en la figura 3.

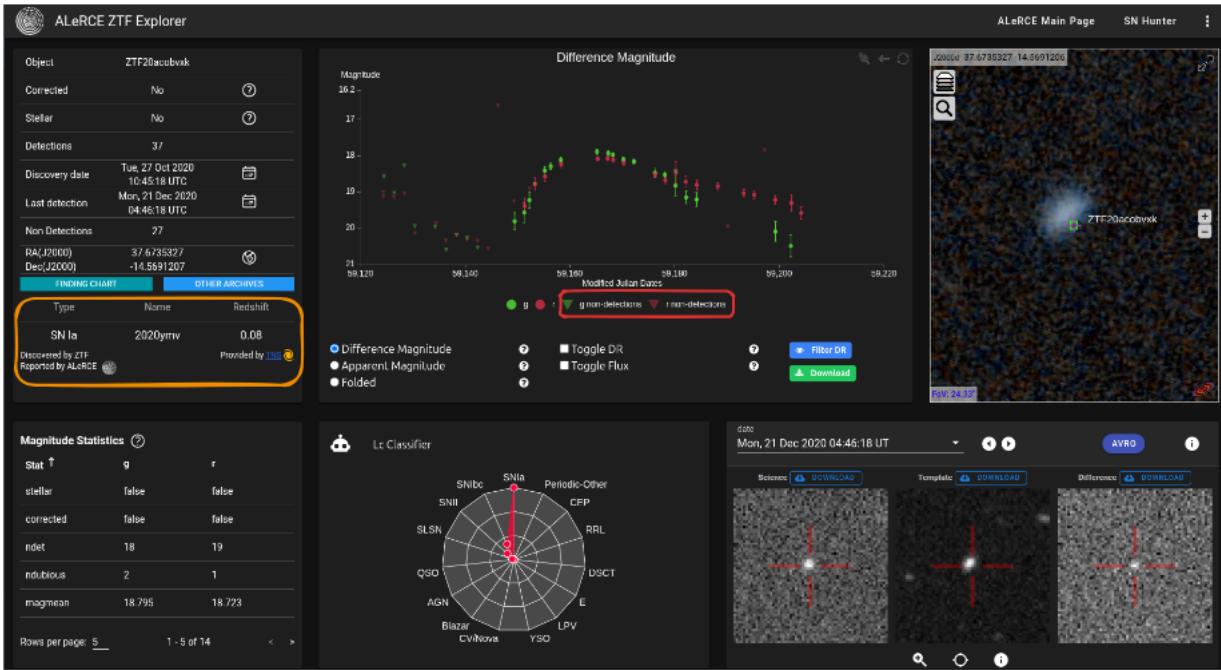


Figura 2: Selección de un resultado de la búsqueda. Ejemplo de curva de luz con filtros g y r .

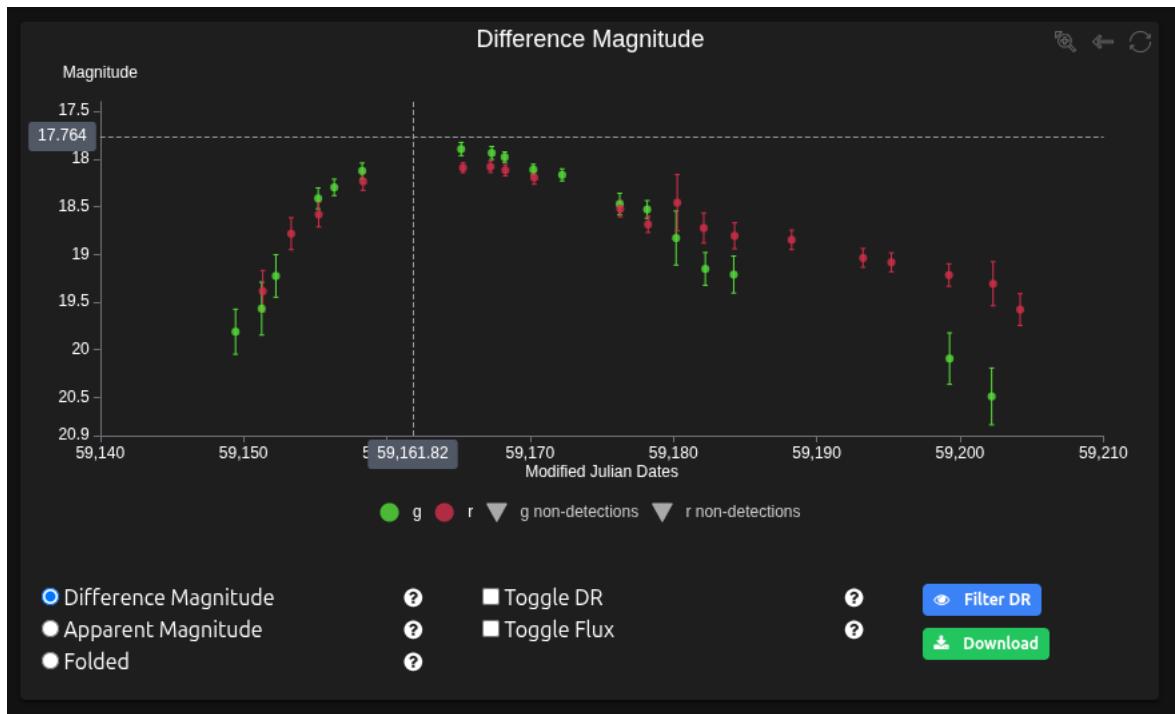


Figura 3: Identificación del punto máximo de brillo aparente en la curva de luz.

Tabla 1: Supernovas tipo Ia seleccionadas y sus principales parámetros.

| Nº | ID Objeto | Nº Detecciones | Probabilidad Máxima |
|----|-----------|----------------|---------------------|
| 1 | | | |
| 2 | | | |
| 3 | | | |
| 4 | | | |
| 5 | | | |
| 6 | | | |
| 7 | | | |
| 8 | | | |
| 9 | | | |
| 10 | | | |

Complete ahora la tabla 1 con los valores de $m_{g,\max}$ y $m_{r,\max}$ obtenidos en ambos filtros para cada una de las supernovas seleccionadas, el *Modified Julian Day* asociado a cada uno de los máximos, el valor de *redshift* (z) de la galaxia anfitriona¹, y el nombre asignado por el IAU, teniendo en cuenta el *ID Object* de cada supernova, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2: Datos de las curvas de luz de la muestra de objetos.

| Número | ID Objeto | Nombre IAU | Máximo (m_g) | MJD (m_g) | Máximo (m_r) | MJD (m_r) | Redshift (z) |
|--------|-----------|------------|------------------|---------------|------------------|---------------|------------------|
| 1 | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | |

Debemos ahora calcular la distancia a cada una de las supernovas seleccionadas. Para esto, usaremos la conocida relación entre el brillo aparente (m), el brillo absoluto (M) y la distancia (d) dada por la ecuación:

$$m - M = 5 \log_{10}(d) - 5 \quad (1)$$

donde $\sigma_m = 0.001$. Puede asumir, como primera aproximación, que para las supernovas tipo Ia, el brillo absoluto en la banda B es $\langle M_B \rangle \approx M_B = -19.3 \pm 0.3$ (Riess et al., 2022) y a partir de las siguientes relaciones $M_g \approx M_B - 0.15$ y $M_r \approx M_B - 0.25$ ² puede hallar la magnitud absoluta en las bandas g y r respectivamente. En cualquiera de los dos filtros (g o r), use la ecuación 1 para calcular la distancia a cada supernova en megapársecs (Mpc). Complete la tabla 2 con los valores

¹En caso de no encontrar reportado en el *ALerCE Explorer* el *redshift* consulte en internet e indique la referencia de donde obtuvo el dato.

²Nota: estas transformaciones son aproximadas.

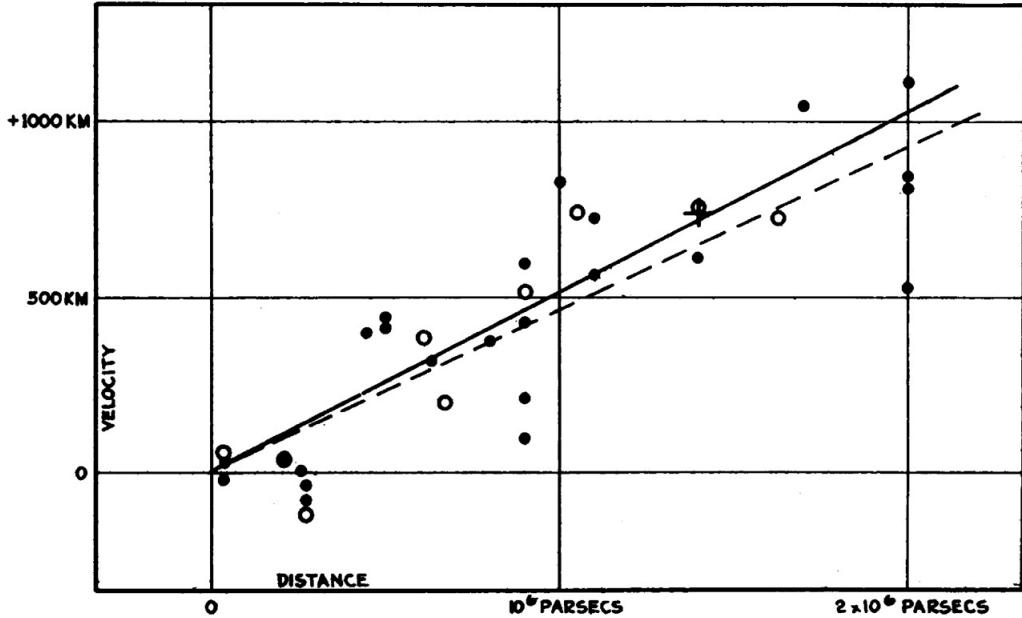


Figura 4: Gráfico original de Hubble (1929) mostrando la relación entre la velocidad de las galaxias y su distancia. Fuente: https://www.astro.puc.cl/~rparra/tools/PAPERS/hubble_1929.pdf.

de distancia obtenidos en ambos filtros con su respectivo error.

Ahora para calcular la constante de Hubble (H_0), usaremos la relación lineal entre la distancia (d) y el *redshift* (z) dada por la ecuación³:

$$d = \frac{c}{H_0} \cdot z \quad (2)$$

donde c es la velocidad de la luz en km/s. Para hallar el valor de H_0 , realice una regresión lineal entre los valores de distancia (d) y *redshift* (z) obtenidos para las supernovas seleccionadas, usando la ecuación 2. Para esto puede usar cualquier herramienta o lenguaje de programación con el que se sienta cómodo. Recuerde que la pendiente de la recta obtenida en la regresión lineal será igual a $\frac{c}{H_0}$, por lo que podrá despejar H_0 . Realice este procedimiento para ambos filtros, g y r y compare los resultados obtenidos.

Finalmente queremos comparar nuestro gráfico obtenido con la obtenida por Hubble (1929). Para esto debemos convertir el valor de *redshift* (z) a velocidad (v) usando la relación:

$$v = c \cdot z \quad (3)$$

donde c es la velocidad de la luz en km/s. A continuación, grafique la velocidad (v) en función de la distancia (d) obtenida anteriormente. Ajuste una línea recta a estos datos. Finalmente, compare su gráfico resultante con el gráfico original de Hubble (figura 4) y analice sus resultados numéricos con el valor aceptado de la constante de Hubble: $H_0 = 73.04 \pm 1.04 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (Riess et al., 2022).

³Esta ecuación es solo válida cuando $z \ll 1$.

3. A entregar para su evaluación

P1) Presente la Tabla 1 de la muestra y la Tabla 2 de los resultados de las curvas de luz, la cual debe incluir los valores calculados de distancia y sus respectivas incertidumbres en ambos filtros. Entregue las imágenes de todas las curvas de luz de las supernovas analizadas. Finalmente, adjunte los gráficos v vs d , incluyendo la regresión lineal obtenida para la determinación de H_0 en los filtros g y r [3pts].

P2) Describir la morfología general de las curvas de luz de las SNIa observadas en la actividad y explicar su relación con el proceso físico de la explosión. [1pts].

P3) Reporte los valores finales de H_0 obtenidos para ambos filtros, incluyendo sus respectivas incertidumbres (σ_{H_0}). A continuación, desarrolle un análisis crítico discutiendo las posibles razones de las diferencias encontradas con el valor esperado ($H_0 = 73.04 \pm 1.04 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$), identificando las principales fuentes de error, explicando el impacto de cada una en el resultado final. Finalmente, recomienda algunos métodos para mejorar la precisión o exactitud de la estimación de H_0 en una actividad futura. [1.5pts].

P4) ¿Qué diferencias fundamentales existen entre la metodología que aplicamos (usando SNIa como candelas estándar y datos ZTF) y la usada por Hubble en 1929? [0.5pts].

Se evaluará la claridad en la presentación de resultados, la correcta interpretación astrofísica, y la calidad de la discusión de errores.

Referencias

Förster, F., Cabrera-Vives, G., Castillo-Navarrete, E., Estévez, P. A., Sánchez-Sáez, P., et al. (2021). The Automatic Learning for the Rapid Classification of Events (ALeRCE) Alert Broker. , 161(5):242.

Howell, D. A. (2011). Type Ia supernovae as stellar endpoints and cosmological tools. *Nature Communications*, 2(1):350.

Hubble, E. (1929). A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 15(3):168–173.

Riess, A. G., Yuan, W., Macri, L. M., Scolnic, D., Brout, D., Casertano, S., Jones, D. O., Murakami, Y., Anand, G. S., Breuval, L., Brink, T. G., Filippenko, A. V., Hoffmann, S., Jha, S. W., D'arcy Kenworthy, W., Mackenty, J., Stahl, B. E., and Zheng, W. (2022). A comprehensive measurement of the local value of the hubble constant with 1 km s1 mpc1 uncertainty from the hubble space telescope and the sh0es team. *The Astrophysical Journal Letters*, 934(1):L7.

Sánchez-Sáez, P., Reyes, I., Valenzuela, C., Förster, F., Eyheramendy, S., Elorrieta, F., Bauer, F. E., Cabrera-Vives, G., Estévez, P. A., Catelan, M., Pignata, G., Huijse, P., De Cicco, D., Arévalo, P., Carrasco-Davis, R., Abril, J., Kurtev, R., Borissova, J., Arredondo, J., Castillo-Navarrete, E., Rodriguez, D., Ruz-Mieres, D., Moya, A., Sabatini-Gacitúa, L., Sepúlveda-Cobo, C., and Camacho-Iñiguez, E. (2021). Alert Classification for the ALeRCE Broker System: The Light Curve Classifier. , 161(3):141.