

PROPIEDADES QUIMICAS DE GIGANTES ROJAS DEL PLANO
Y DEL DISCO GALACTICO

CHEMICAL PROPERTIES OF RED GIANTS BELONGING TO THE PLANE
AND THE GALACTIC DISK

Juan J. Clariá*

OAC y CONICET

* Astrónomo visitante del Observatorio Interamericano de
Cerro Tololo (Chile), operado por AURA, Inc.

Resumen: La distribución de elementos pesados en el plano y disco de nuestra Galaxia es examinada sobre la base de nuevos datos fotométricos UBV, DDO y CMT_1T_2 de gigantes rojas pertenecientes a medio centenar de cúmulos abiertos. El contenido metálico se deriva de los siguientes indicadores de abundancia: $\delta(U-B)$, δCN , $\Delta(C-M)$ y $\Delta(M-T_1)$, los cuales recogen información tanto de la región azul-ultravioleta del espectro, como de una porción próxima al rojo. Se encuentra que: (1) En general, los parámetros $\delta(U-B)$ y δCN conducen a resultados similares a los obtenidos a partir del índice $\Delta(C-M)$ del sistema de Washington, el cual es sensible a la abundancia de hierro y elementos del grupo CNO. (2) Existen evidencias de sobreabundancias de elementos del grupo CNO en

las ramas gigantes de algunos cúmulos estudiados. (3) Independientemente de la morfología, edad o posición en la Galaxia, todas las estrellas rojas evolucionadas de un mismo cúmulo son, en general, idénticas en composición química. Esta propiedad se mantiene aún en los cúmulos aparentemente enriquecidos en elementos del grupo CNO. Se presentan argumentos que permiten descartar la convección como mecanismo de mezcla de elementos pesados desde el interior hacia la superficie de las estrellas. Si bien las metalicidades de los cúmulos más jóvenes que $\sim 6 \times 10^8$ años no varían sistemáticamente con la edad, esta población estelar aparenta ser, en promedio, ligeramente más rica en metales que las gigantes K de la inmediata vecindad solar. Es probable que estos objetos se hayan formado a partir de un material que no estuvo suficientemente bien mezclado en los últimos 6×10^8 años. Por otra parte, si bien los cúmulos del disco manifiestan una clara variación de la abundancia con la edad, la metalicidad de los cúmulos más jóvenes de este subsistema es similar, en promedio, a la de los objetos del plano. La existencia de un gradiente de abundancia, tanto en el plano como en el disco de nuestra Galaxia, queda claramente demostrada.

ABSTRACT: The distribution of heavy elements in the plane and the disk of our own Galaxy is examined from new UBV, DDO, and CMT_1T_2 photometric data of red giants belonging to fifty open clusters. The metal content is derived from the following four abundance parameters: $\delta(U-B)$, δCN , $\Delta(C-M)$, and $\Delta(M-T_1)$, which take information not only from the blue-ultraviolet spectral region but also from the near red. It is found that: (1) In general, the $\delta(U-B)$ and δCN parameters give results very close to those of the

Fe+CNO-sensitive $\Delta(C-M)$ index of the Washington system. (2) CNO is enhanced with respect to the iron-peak elements in the giant branches of some clusters. (3) Regardless the morphology, age, and position in the Galaxy, all the red evolved stars in the same cluster are, in general, identical in chemical composition. This result holds for the clusters having enhancement of the CNO elements. Arguments are presented which allow us to reject the convection as a mixing mechanism of heavy elements to the surface of the stars from their interiors. Although no evidence for a variation of $[Fe/H]$ with age in the last 6×10^8 years is found, this stellar population appears to be, in the mean, slightly richer in metals than the average for solar neighborhood K giants. These clusters may probably have formed from material which was not sufficiently well mixed during the last $\sim 6 \times 10^8$ years. On the other hand, although the disk clusters show a clear variation of abundance with age, the metallicity of the younger disk clusters is similar, in the mean, to those of the galactic plane. The existence of an abundance gradient in the disk and the plane of our own Galaxy is clearly demonstrated.

I. INTRODUCCION

Es indudable que el conocimiento de las propiedades de los cúmulos estelares ha desempeñado y aún desempeña un papel fundamental en el desarrollo de la Astrofísica. Gran parte de lo que hoy sabemos acerca de la estructura y evolución de la Galaxia, e incluso acerca de la formación,

estructura y evolución de las estrellas, proviene de una manera directa o indirecta del estudio de los cúmulos estelares, tanto de sus propiedades globales, como de las propiedades individuales de sus miembros.

II. ESTUDIO DE GIGANTES ROJAS: PRINCIPALES OBJETIVOS

Hasta hace relativamente poco tiempo, estábamos principalmente interesados en conocer las propiedades globales de los cúmulos, tales como morfología, diámetros angulares y lineales, distancias, posición en la Galaxia o función de luminosidad deducida de recuentos estelares. En verdad, todas estas propiedades pueden derivarse bastante bien, sin necesidad de conocer en detalle cada estrella. Desde ese punto de vista, conocemos bastante bien a los cúmulos estelares. Sin embargo, en lo que se refiere a las propiedades de cúmulos deducidas del conocimiento de las características individuales de cada estrella, nuestro conocimiento es bastante exiguo. Por ejemplo, sabemos bastante poco acerca de la frecuencia de binarias, de la función de masa, de la distribución de velocidades rotacionales dentro de un cúmulo, de la frecuencia y tipo de estrellas peculiares, carecemos de un buen inventario de estrellas variables, etc. Es obvio que, en general, nuestra ignorancia aumenta con la magnitud integrada del agregado.

Tal vez esto explica de alguna manera nuestro interés en determinar y analizar las propiedades astrofísicas más relevantes de los miembros de cúmulos estelares. Muy en particular, desde hace varios años hemos venido estudiando gigantes y supergigantes rojas pertenecientes a cúmulos abiertos con un amplio rango de edades. Este proyecto, al

que se agregó poco después de iniciado E. Lapasset y más recientemente D. Minitti, es bastante general y persigue diferentes objetivos, de los cuales dos quizás son los más importantes, a saber: (1) Aportar datos ópticos de gigantes y supergigantes rojas en cantidad y calidad suficientes como para ampliar nuestro conocimiento actual de la composición química de la Galaxia como un todo. Este objetivo es, por cierto, bastante amplio y ambicioso, e incluye problemas tales como la distribución de elementos pesados en el plano y en el disco, variación de abundancia con edad y posición en la Galaxia, naturaleza del gradiente galáctico de composición química, etc. (2) Investigar la estructura y morfología de la región gigantes rojas en el diagrama HR de los cúmulos abiertos. Esto implica conocer la posición de las ramas ascendentes, ubicación de los "clumps", poblaciones relativas de estrellas en fases diferentes, extensión de "carozos convectivos", etc.

Si bien este segundo punto se encuentra actualmente en pleno desarrollo, no será considerado en este trabajo. En lo que se refiere al primer objetivo, la elección de la componente estelar seleccionada se justifica por las siguientes razones: (1) Las estrellas más tardías que G0 constituyen la componente estelar más numerosa de nuestra Galaxia y de muchas otras Galaxias. (2) Las gigantes G y K pertenecen tanto a la componente plana, como a la población del disco y del halo. (3) Estas estrellas son objetos de alta luminosidad y, en consecuencia, pueden ser observados aún cuando se encuentran a grandes distancias del sol. (4) Contrariamente a lo que ocurre con las estrellas de tipos tempranos, las estrellas G y K constituyen un campo propicio para la aplicación de ciertas técnicas ópticas de observación sumamente

eficientes y expeditivas, sobre las que se basa este proyecto netamente observacional.

III. MATERIAL OBSERVACIONAL RECOLECTADO

Hasta hoy, todo lo realizado con respecto a este proyecto se relaciona con los subsistemas plano y disco de nuestra Galaxia. El material observacional ha sido obtenido parte en el Observatorio de Kitt Peak (Estados Unidos) y la mayor parte en los Observatorios de Cerro Tololo, Las Campanas y La Silla, en Chile (ver Tabla I). Hasta el momento hemos obtenido flujos radiantes de alta precisión en las bandas de los sistemas UBV y DDO para aproximadamente 300 gigantes rojas de 70 cúmulos abiertos de ambos hemisferios celestes, la mitad de los cuales fueron también medidos en el sistema fotométrico de Washington. En general, los datos son de excelente calidad ya que los errores típicos UBV y DDO son del orden de 0.01-0.02, mientras que los del sistema de Washington no exceden unos pocos milésimos. Parte de este material ha sido ya analizado y sus resultados debidamente publicados (Clariá, 1985a, 1985b; Clariá y Lapasset, 1983a, 1983b, 1985a, 1985b, 1986a, 1986b, 1986c, 1986d). El restante material, juntamente con un análisis detallado de los resultados, será publicado en próximos estudios. En el presente trabajo se hace uso de gran parte del material obtenido hasta el momento para realizar un análisis preliminar de la distribución de metalicidades en la Galaxia. Las conclusiones acá alcanzadas podrán variar, aunque no sustancialmente, una vez que se obtengan los resultados definitivos.

TABLA I

OBSERVATORIO	PAIS	TELESCOPIOS	TURNOS
Kitt Peak	E.E.U.U.	61 y 91 cm	1
Cerro Tololo	Chile	41, 61, 91 y 100 cm	6
Las Campanas	Chile	61 cm	4
La Silla	Chile	100 cm	1

IV. DISTRIBUCION DE ELEMENTOS PESADOS EN EL PLANO Y EN EL DISCO

¿Cómo se distribuyen los elementos pesados en el plano y en el disco de nuestra Galaxia? En la Figura 1 puede apreciarse que sobre una muestra de 38 cúmulos jóvenes del plano galáctico, la razón $[Fe/H]$ que nosotros derivamos no varía en forma sistemática con la edad, al menos en los últimos 600 millones de años. En dicha figura, cada círculo negro con su barra representa el promedio de metalicidades de las gigantes rojas de todo un cúmulo y su correspondiente error. Se aprecia también en la Figura 1 que, para una determinada edad, existe una apreciable dispersión en los valores de la razón $[Fe/H]$, resultado éste que difícilmente pueda deberse a los errores involucrados. En promedio, sin embargo, esta población aparenta ser ligeramente más abundante en metales que las gigantes K de la vecindad solar. A pesar de las imprecisiones en las metalicidades calculadas, parecería que el material a partir del cual se formaron estos objetos no estuvo suficientemente bien mezclado en los últimos 600 millones de años.

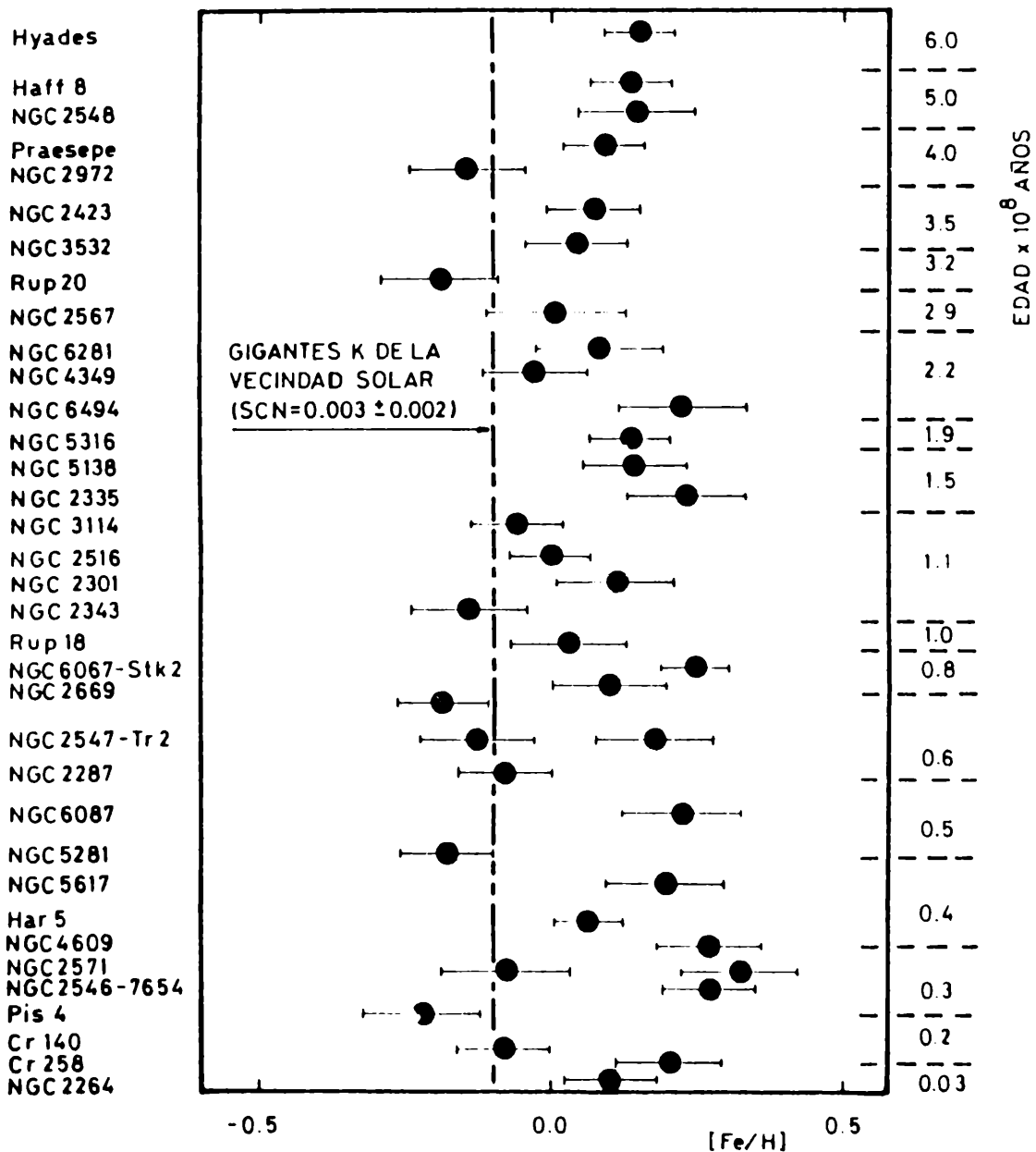


Figura 1: Variación de la razón $[Fe/H]$ de cúmulos abiertos pertenecientes al plano galáctico en función de la edad de los mismos.

Los resultados correspondientes a los cúmulos del disco se ilustran en la Figura 2. Si bien en la misma se han incluido algunos resultados obtenidos por otros autores, resulta muy clara la variación de la abundancia con la edad. Todo parece indicar que los cúmulos más viejos del disco se han formado a partir de un material deficiente en metales, mientras que los cúmulos más jóvenes de este subsistema parecen haberse formado a partir de un material probablemente enriquecido por restos de generaciones estelares que los precedieron. Cabe agregar que la abundancia de los cúmulos más jóvenes del disco es similar, en promedio, a la de los cúmulos del plano.

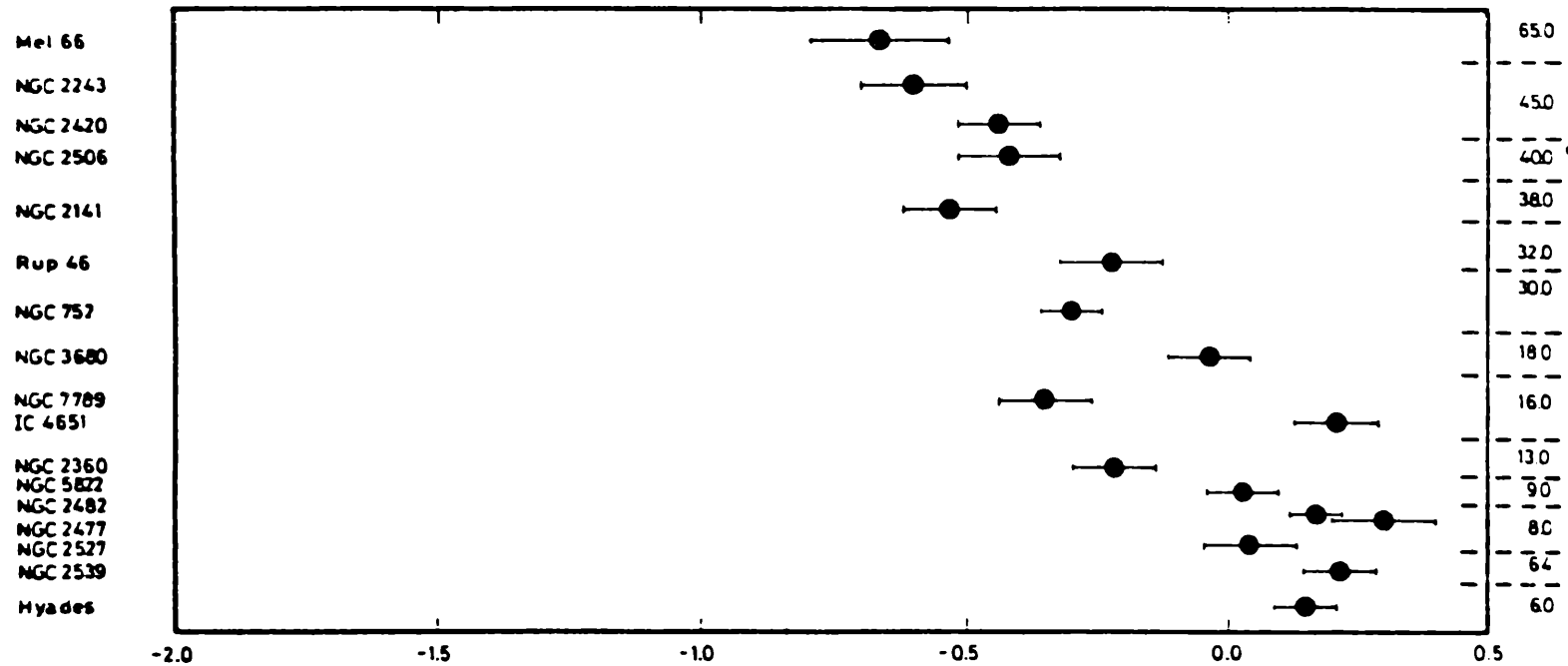


Figura 2: Variación de la razón $[Fe/H]$ de cúmulos abiertos del disco galáctico en función de la edad de los mismos.

V. GRADIENTE GALACTICO DE COMPOSICION QUIMICA

En la actualidad sólo tenemos una vaga idea de cómo se distribuyen los elementos pesados en nuestra Galaxia. Esto se debe quizás a que no existen procedimientos expeditivos que puedan ser aplicados a numerosos objetos y que, a la vez, suministren información en un tiempo relativamente pequeño. De los tres parámetros teóricos de composición química (X,Y,Z), el único que ha sido determinado indirectamente en un número apreciable de estrellas es Z. En realidad, lo que se determina en la mayoría de los casos es la razón (Fe/H) , definida en la forma usual. Esta razón está íntimamente relacionada con las abundancias de los otros elementos químicos que incluye Z.

En la Figura 3 se muestra de qué manera varía la abundancia metálica en función de la distancia galactocéntrica de la muestra estudiada. Para confeccionar este diagrama, hemos promediado las metalicidades de los cúmulos en diferentes intervalos de distancias galactocéntricas, asignando pesos diferentes a cada cúmulo de acuerdo al número de gigantes rojas. Más allá de las imprecisiones involucradas, este diagrama demuestra que efectivamente existe un gradiente de composición química en nuestra Galaxia, tanto en el disco como en el plano, siendo más pronunciado en el primero de estos subsistemas. Este resultado parece demostrar que no sólo la edad, sino también y de una manera fundamental, la posición en la Galaxia determina la distribución de elementos pesados. Un simple ajuste de los puntos por cuadrados mínimos conduce a un gradiente de -0.09 para el plano y -0.12 para el disco.

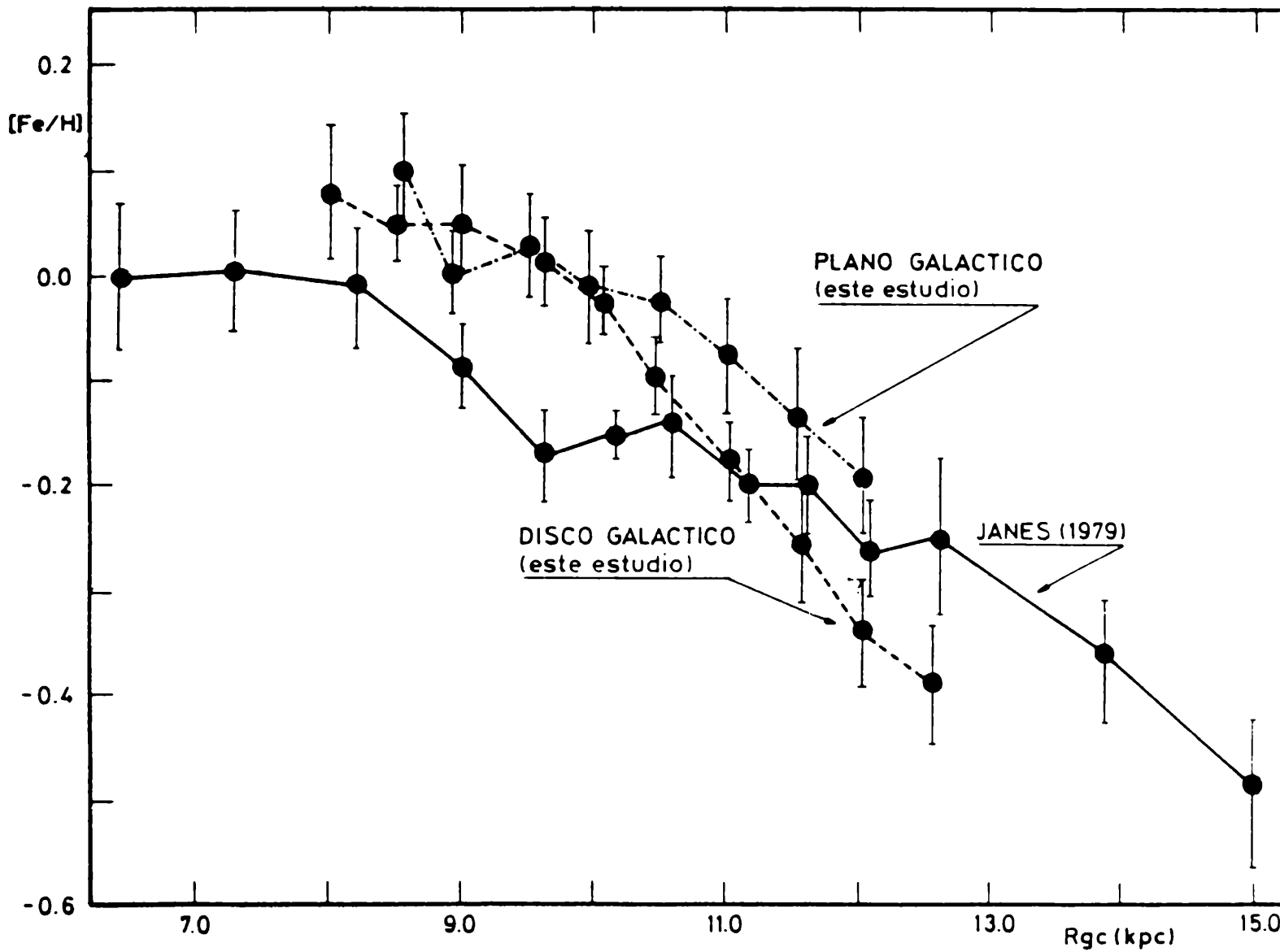


Figura 3: Variación de la razón Fe/H de la componente estelar estudiada en función de la distancia galactocéntrica. Cada punto representa el promedio de las metalicidades de grupos de cúmulos incluidos en intervalos de 500 pc de distancia. Por comparación, se muestra el gradiente galáctico de composición química obtenido por Janes (1979).

En los últimos 15 años han aparecido varios trabajos que parecen demostrar que la metalicidad en los discos de algunas galaxias externas disminuye en general a medida

que aumenta la distancia al centro. Estos trabajos netamente observacionales, juntamente con una serie de predicciones teóricas de gradientes de composición química en galaxias externas, parecerían demostrar que una propiedad general de los discos galácticos podría estar representada por algún tipo de variación de composición química a gran escala de los mismos.

Sin embargo, con respecto a nuestra Galaxia, existe cierta contradicción o al menos cierta confusión, en lo que se refiere a la naturaleza real del gradiente químico. En efecto, si sólo consideramos algunos de los estudios ópticos más relevantes, podemos notar que mientras Glegg y Bell (1973), por ejemplo, usando datos uvby de estrellas F, o Jennes y Helfer (1975) usando datos UBViyz de gigantes G y K, no encuentran variación alguna de abundancia con posición en la Galaxia, otros autores tales como Mayor (1976), D'Odo-rico y otros (1976), Hawley (1978) y Peimbert y otros (1978), han demostrado que este gradiente existe tanto en la componente estelar como en la gaseosa, aunque desde el punto de vista cuantitativo las diferencias o las inconsistencias son apreciables.

Uno de los estudios ópticos más completos sobre esta materia ha sido realizado por Janes (1979), usando fotometría DDO de gigantes G y K del campo y de cúmulos abiertos; es decir, componente estelar y técnicas más o menos parecidas a las nuestras. Sus resultados, visibles en la Figura 3, abarcan 8 kpc de distancias galactocéntricas y no 5 kpc como en nuestro caso. Si comparamos nuestros resultados con los de Janes, notamos razonable coincidencia desde el punto de vista cualitativo, no así en cambio desde el punto de vista cuantitativo. En efecto, una simple regresión lineal de los datos muestra que nuestro gradiente supera en aproximadamente un factor dos al de Janes.

VI. ORIGEN DE LOS DEBACUERDOS

¿A qué se deben las discrepancias antes mencionadas? ¿Cuál es su verdadero origen? Nosotros creemos que estos resultados aparentemente contradictorios podrían quizás deberse al hecho de que, en la mayoría de los casos, el contenido metálico proviene de una determinación fotométrica, basada por lo general en algún sistema definido en la porción verde-azul o azul-violeta del espectro. Cuando la información de abundancia se extrae de otra región, roja o infrarroja por ejemplo, pueden surgir algunas inconsistencias. Un ejemplo típico es el cúmulo globular 47 Tucanae, para el cual Osborn y McClure (1974) obtienen $[Fe/H] = -0.5$ (moderadamente pobre en metales) a partir de datos DDO, mientras que Pilachowski y colaboradores (1980) obtienen $[Fe/H] = -1.2$, ya sea usando datos espectroscópicos de alta dispersión o datos fotométricos de la región roja-infrarroja del espectro. Estas inconsistencias pueden deberse a que, para las estrellas G y K, los parámetros de abundancia basados en la región verde-azul o azul-violeta del espectro están afectados por la presencia de bandas moleculares de compuestos de CN y CH, es decir, elementos del grupo CNO. En otras palabras, creemos que estos parámetros pueden depender de la razón $[Fe/CNO]$, la cual a su vez, puede ser una función más o menos compleja de la edad y la posición en la Galaxia.

VII. SISTEMA $CMT_1 T_2$: PRINCIPALES PROPIEDADES

Desde el punto de vista observacional sería indudablemente de gran interés disponer de una técnica que permita separar el efecto blanketing molecular debido a las bandas

de CN y CH, del blanketing metálico debido a las líneas específicas del hierro. Precisamente, esta separación puede hacerse usando el sistema CMT_1T_2 desarrollado no hace mucho por Canterna (1976).

Este sistema incluye 4 filtros de bandas anchas centrados aproximadamente en 3900, 5100, 6300 y 8000 Å y ha sido definido para ser usado con una fotomultiplicadora RCA 31034 de Ga-As, la cual tiene una alta eficiencia cuántica de casi el 50% en el U cercano y una excelente respuesta en el rojo hasta cerca de 9000 Å.

Este nuevo sistema, usado hasta hoy casi con exclusividad por Canterna y sus colaboradores, fue definido con el principal objetivo de obtener temperaturas superficiales de alta precisión, abundancias metálicas y un índice de CN de estrellas G y K. Para el estudio de estas estrellas, el sistema presenta claras ventajas respecto del clásico sistema UBV. Entre otras, podemos recordar que el sistema UBV no permite separar el blanketing metálico del molecular, ni dispone de un buen indicador de temperatura para estrellas G y K. Para peor, Bohm-Vitense (1973) y Bell y Gustaffson (1975) han mostrado que el índice (U-B) es completamente insensible a metalicidad para gigantes de población II con $[Fe/H]$ menor que -0.5 y (B-V) mayor que 0.90.

Las bandas T_1 y T_2 se han elegido de tal manera que yacen en una región prácticamente libre de blanketing metálico y molecular. El índice (T_1-T_2) tiene en consecuencia el mismo excelente grado de sensibilidad a la temperatura que el (R-I) del sistema de Johnson para estrellas G y K. Por su parte, la banda M yace en una región que incluye líneas metálicas (particularmente de hierro) y evita las bandas de CN en 3595, 3883 y 4215 Å y la banda G en 4300 Å. Finalmente, la banda C se eligió de tal manera que incluya los

efectos totales del blanketing molecular en las estrellas G y K. También incluye líneas metálicas.

El sistema CMT_1T_2 es más eficiente que el UBV, ya que no sólo brinda mayor y más precisa información, sino que a igualdad de telescopio, requiere mucho menor tiempo de observación para permitir determinar temperatura y abundancia.

Con los 4 filtros se definen tres índices de color: (T_1-T_2) , un indicador de temperatura prácticamente independiente de efectos de luminosidad y abundancia; $(M-T_1)$, indicador de abundancia metálica (particularmente hierro) basado en la región verde-roja del espectro, y $(C-M)$, un parámetro sensible a la abundancia de hierro y elementos del grupo CNO, basado en la región azul-verde del espectro.

VIII. USO COMBINADO DE FOTOMETRIA UBV Y DDO

Nuestra experiencia previa nos ha mostrado que si se miden flujos radiantes de gigantes rojas en las bandas de los sistemas UBV y DDO y se combinan estos datos, es posible:

(1) Minimizar efectos de contaminación por estrellas del campo. Para ello hemos definido y estamos usando criterios fotométricos que permiten separar bastante bien gigantes rojas de un cúmulo, de estrellas tardías (evolucionadas o no) del campo (Clariá y Lapasset 1983a, Clariá 1985a).

(2) Determinar enrojecimiento interestelar de estrellas tardías usando un procedimiento iterativo descrito por Janes (1977).

(3) Calcular anomalías de cianógeno δ CN (Janes 1975) y determinar las propiedades fundamentales de las atmósferas de las gigantes rojas, esto es, gravedades superficiales y temperaturas efectivas (Osborn 1973, 1979; Osborn y Clariá 1976).

(4) Estimar masas (Clariá y Lapasset 1983a), luminosidades intrínsecas (Janes 1975), abundancia de helio (Osborn y Clariá 1976), y otros parámetros.

De lo expresado precedentemente se desprende que las técnicas fotométricas UBV, DDO y CMT_1T_2 son complementarias en varios aspectos. Su aplicación simultánea a las gigantes rojas permite, no sólo determinar las principales propiedades astrofísicas de estas estrellas, sino también examinar el grado de enriquecimiento o sobreabundancia de elementos del grupo CNO en las atmósferas de las mismas.

IX. INDICADORES FOTOMETRICOS DE COMPOSICION QUIMICA

La determinación de la razón $[Fe/H]$ de la rama gigante de cada cúmulo se llevó a cabo a partir de la información fotoeléctrica recogida tanto de la región azul-ultravioleta, como de una región próxima al rojo. De esta manera, no sólo es posible estimar la $[Fe/H]$, sino que además es posible detectar posibles sobreabundancias de compuestos moleculares que incluyen elementos del grupo CNO.

El primer indicador de abundancia utilizado proveniente de la región azul-violeta del espectro, es el índice $C_0(41-42)$ de la fotometría DDO, desafectado de absorción interestelar. Este es un excelente indicador de la intensidad de la banda de CN en 4215 \AA de estrellas G y K. Cuanto mayor es este índice, mayor es la absorción producida por dicha banda. Para cada gigante roja calculamos la anomalía de cianógeno (δCN), ésto es, el exceso (o deficiencia) en magnitud de dicho índice respecto del valor normal correspondiente a una estrella de la misma gravedad y temperatura que la estrella en cuestión. Para lograr ésto usamos relaciones del siguiente tipo:

$$\begin{aligned}
EC(45-48) &= \alpha_1 E(B-V) & \rightarrow & C_0(45-48) = C(45-48) - EC(45-48) \\
EC(42-45) &= \alpha_2 E(B-V) & \rightarrow & C_0(42-45) = C(42-45) - EC(42-45) \\
EC(41-42) &= \alpha_3 E(B-V) & \rightarrow & C_0(41-42) = C(41-42) - EC(41-42)
\end{aligned}$$

en las cuales los coeficientes α_i los obtuvimos de las curvas de enrojecimiento de Whitford (1958), Whiteoak (1966), Nandy y otros (1975) y Schild (1977). Los valores extremos de los α_i son: $0.30 \leq \alpha_1 \leq 0.35$, $0.21 \leq \alpha_2 \leq 0.24$, $0.06 \leq \alpha_3 \leq 0.09$ y, en general, la elección de los mismos no influye mayormente en los resultados. Los valores adoptados fueron: $\alpha_1 = 0.32$, $\alpha_2 = 0.23$ y $\alpha_3 = 0.08$.

Cuando la precisión de los datos (U-B) lo justifica, examinamos también la abundancia de los elementos pesados a partir de otro indicador de la región azul-ultravioleta del espectro: el exceso ultravioleta $\delta(U-B) = (U-B)_0 - (U-B)_n$. Este parámetro se calculó con respecto a las gigantes K del campo y no, como suele ser usual, respecto de las gigantes de las Hyades. Para el cálculo usamos una expresión del siguiente tipo (Janes 1979):

$$E(U-B) = \left[0.32(B-V) - 0.25(B-V) + 0.62 \right] E(B-V),$$

la cual reproduce dentro del 1% del $E(B-V)$ los resultados de Crawford y Mandwewala (1976) en el rango G2III a K5III.

Usamos además dos indicadores de abundancia adicionales, denotados $\Delta(C-M)$ y $\Delta(M-T_1)$, basados en la región verde-azul y verde-roja del espectro. Cada uno de éstos representa el exceso (en magnitudes) del índice de color respectivo, desafectado de absorción interestelar, respecto del valor normal de una estrella con igual $(T_1 - T_2)_0$ que la estrella en cuestión. Es decir:

$$\Delta(C-M) = (C-M)_0 - (C-M)_n$$

$$\Delta(M-T_1) = (M-T_1)_0 - (M-T_1)_n$$

Canterna (1976) pudo demostrar que $\Delta(M-T_1)$ es prácticamente independiente del enrojecimiento y de la luminosidad en el rango G2-K5. Para calcular estos parámetros usamos las siguientes relaciones derivadas por Canterna y Harris (1979):

$$E(C-M) = 1.10 E(B-V)$$

$$E(M-T_1) = 0.95 E(B-V)$$

$$E(T_1-T_2) = 0.72 E(B-V)$$

Canterna y Harris (1979) calibraron empírica y teóricamente los parámetros $\Delta(C-M)$ y $\Delta(M-T_1)$ en términos de la $[Fe/H]$. En el primer caso, usaron razones $[Fe/H]$ de 38 gigantes G y K determinadas a partir de espectros de alta dispersión. En el segundo caso, usaron modelos de atmósferas de Bohm-Vitense y Szkody (1974) en un rango de temperaturas, gravedades y metalicidades similar al de las estrellas usadas para determinar la calibración empírica. Las relaciones empíricas y teóricas obtenidas presentan un excelente acuerdo, de manera que pueden ser usadas indistintamente. Por razones de sencillez hicimos uso siempre de la calibración empírica. Recientemente, Canterna y otros (1986) han publicado una calibración empírica revisada, la cual presenta leves diferencias con respecto a $\Delta(M-T_1)$ y cambios apreciables con respecto al punto cero del parámetro $\Delta(C-M)$.

Al igual que $\Delta(C-M)$ y $\Delta(M-T_1)$, los parámetros $\delta(U-B)$ y δCN han sido calibrados en función de $[Fe/H]$ por diversos autores. En el presente trabajo hemos usado las relaciones derivadas por Janes (1975, 1979). Denotaremos en adelante con $[Fe/H]_{DDO}$, $[Fe/H]_{UBV}$, $[Fe/H]_{CM}$ y $[Fe/H]_{MT}$ las razones hierro a hidrógeno determinadas a partir de los

parámetros $\delta(U-B)$, δCN , $\Delta(C-M)$ y $\Delta(M-T_1)$, respectivamente.

Puesto que los índices $C_0(41-42)$ y $\Delta(C-M)$ recogen información de la misma región espectral, deberían conducir a resultados aproximadamente similares. Es decir,

$[Fe/H]_{DDO}$ y $[Fe/H]_{CM}$ deberían ser muy parecidos. Si esto ocurre a su vez con la $[Fe/H]_{MT}$, adoptamos para esa estrella el promedio de las 3 determinaciones. Si, por el contrario, la diferencia $\Delta F = |[Fe/H]_{MT} - [Fe/H]_{CM}|$ es significativa, interpretamos ese resultado como debido a la contaminación de CN y CH en la atmósfera de la estrella considerada. Esta es evidentemente una decisión crucial. Teniendo en cuenta los errores típicos la fotometría de Washington y las imprecisiones involucradas en las respectivas calibraciones, adoptamos el valor $\Delta F = 0.4$ como cota mínima, para la detección fotométrica de contaminación de CN y CH.

X. HOMOGENEIDAD QUIMICA DE GIGANTES ROJAS

Los resultados de abundancia obtenidos demuestran que, en general, existen variaciones de un sistema a otro. Tal como deberíamos esperar, la razón $[Fe/H]_{DDO}$ presenta un buen acuerdo con $[Fe/H]_{CM}$ en la gran mayoría de los sistemas observados. En algunos cúmulos, el valor medio de los índices de contaminación ΔF supera el valor límite de 0.4, indicando que las atmósferas de las gigantes rojas del cúmulo considerado están probablemente enriquecidas en elementos del grupo CNO. Como ejemplos de ramas gigantes posiblemente contaminadas en CNO pueden citarse las de NGC 2482 (Clariá y Lapasset 1983a), NGC 5822 (Clariá y Lapasset 1985a) y NGC 2539 (Clariá y Lapasset 1986a). Debe destacarse, sin embargo, que el aparente enriquecimiento en CNO de estos cúmulos

disminuye, o incluso desaparece, si se utiliza la calibración revisada de Canterna y otros (1986).

Por otra parte, existe una marcada uniformidad en los valores individuales de los distintos indicadores de abundancia. Esta homogeneidad química ocurre no sólo para las gigantes rojas, sino incluso también para las estrellas de la pseudo-rama horizontal, usualmente interpretadas como objetos que han pasado la etapa del fogonazo de helio y se encuentran en un estado evolutivo en el cual comienza a quemarse el helio del corazón convectivo de la estrella.

Este último resultado es en general una propiedad común a todos los cúmulos estudiados. Es decir, independientemente de la morfología, edad o metalicidad, todas las estrellas rojas evolucionadas de un mismo cúmulo abierto son, en general, idénticas en composición química. En algunos cúmulos, existen claros indicios de contaminación por elementos del grupo CNO, pero aún en ellos la homogeneidad química es una propiedad característica. Sólo unas pocas estrellas individuales de unos pocos cúmulos parecen apartarse de la tendencia general. En la Tabla II se muestran precisamente algunas de estas excepciones. Puede notarse en esta tabla la diferencia de los parámetros de abundancia de cada estrella respecto de los valores medios de cada cúmulo. Posibles anomalías en la evolución de estas estrellas podrían tal vez explicar estos casos excepcionales.

La comprobada homogeneidad química en los cúmulos abiertos estudiados nos sugiere al menos un par de interpretaciones. En primer lugar, creemos que es poco probable que en las estrellas de los cúmulos abiertos se hayan mezclado por convección elementos químicos desde el interior hacia la

superficie, o en todo caso, si este proceso realmente aconteció, los efectos no parecen ser detectables fotométricamente. En los casos de evidente sobreabundancia de CNO, una posibilidad es que el sistema se haya formado directamente a partir de un gas ya contaminado por elementos del grupo CNO. En segundo lugar, la uniformidad en la composición química de los cúmulos abiertos permite eliminar la posibilidad de que las estrellas de estos cúmulos puedan provenir de diferentes generaciones estelares, tal como parece acontecer en varios cúmulos globulares. En efecto, numerosas observaciones demuestran que en general hay fuertes variaciones de abundancia entre las estrellas de un mismo cúmulo globular (Hesser y otros 1977). Omega Centauri y M22 son dos ejemplos dramáticos (Smith 1987). Para explicar estas diferencias observadas podríamos presentar varias alternativas. Aquella que nos parece quizás la más razonable consiste en aceptar que la causa principal radica en la diferencia de masas y edades típicas de las dos clases de agregados considerados. Los cúmulos globulares, al ser más masivos, podrían estar en condiciones de producir una segunda o quizás tercera generación de estrellas con diferentes composiciones. Por el contrario, los cúmulos abiertos con masas considerablemente menores, es probable que no puedan retener los materiales eyectados por la primera generación de supernovas. En síntesis, la uniformidad química observada en los cúmulos abiertos parecería demostrar que en todos los casos estamos observando la abundancia metálica inicial u original, contaminada o no por CNO, de estos sistemas.

TABLA II

Bigantes rojas con inhomogeneidades químicas en cúmulos abiertos

CUMULO	ESTRELLA	δ_{CN}	$\overline{\delta_{CN}}$	$\Delta(C-M)$	$\overline{\Delta(C-M)}$	$\Delta(M-T_1)$	$\overline{\Delta(M-T_1)}$
NGC 2204	1329	0.087	-0.053	-	-	-	-
NGC 2423	1	-0.056	+0.073	-0.045	-0.149	0.071	0.014
NGC 4349	174	0.072	0.010	-0.117	0.005	0.016	0.023
NGC 5316	45	-0.004	0.075	-0.164	-0.249	0.004	-0.031
Me1 66	4326	0.066	-0.066	-	-	-	-
IC 4651	23	0.120	0.071	-0.210	-0.136	-0.020	0.001

El autor agradece a las autoridades del Observatorio de Cerro Tololo y del Observatorio de Las Campanas por haber permitido el acceso a sus instalaciones. Se agradece también la colaboración prestada por los Sres. J. Laborde y J.L. Vittor en la confección de los dibujos. Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) de la República Argentina.

REFERENCIAS

- Bell, R.A. y Gustaffson, B. 1975, in Multicolour Photometry and the Theoretical HR Diagram, A.G.D. Philip, Ed., Dudley Obs.
- Bohm-Vitense, E. 1973, Astron. Astrophys. **24**, 447.
- Bohm-Vitense, E. y Szkody, P. 1974, Astrophys. J. **193**, 607.
- Canterna, R. 1976, Astron. J. **81**, 228.
- Canterna, R. y Harris, H.C. 1979, en "Problems of Calibration of Multicolour Photometric Systems", Ed. A.G.D. Philip, Dudley Obs., Schenectady, p. 199.
- Canterna, R.; Geisler, D.; Harris, H.C.; Olszewski, E. y Schommer, R. 1986, Astron. J. **92**, 79.
- Clariá, J.J. 1985a, Astron. Astrophys. Suppl. **59**, 195.

- Clariá, J.J. 1985b, Bol. Asoc. Arg. Astron. **30**, 53.
- Clariá, J.J. y Lapasset, E. 1983a, Astrophys. & Astron. **4**, 117.
- Clariá, J.J. y Lapasset, E. 1983b, Primer Encuentro de Astrónomos Iberoamericanos, Granada (España), p. 57.
- Clariá, J.J. y Lapasset, E. 1985a, M.N.R.A.S. **214**, 229.
- Clariá, J.J. y Lapasset, E. 1985b, Bol. Asoc. Arg. de Astron. **30**, 66.
- Clariá, J.J. y Lapasset, E. 1986a, Astrophys. J. **302**, 656.
- Clariá, J.J. y Lapasset, E. 1986b, Astron. J. **91**, 326.
- Clariá, J.J. y Lapasset, E. 1986c, Bol. Asoc. Arg. de Astron. **31**, 381.
- Clariá, J.J. y Lapasset, E. 1986d, Bol. Asoc. Arg. de Astron. **31**, 392.
- Clegg, R.E.S. y Bell, R.A. 1973, M.N.R.A.S. **163**, 13.
- Crawford, D.L. y Mandwewala, N. 1976, P.A.S.P. **88**, 917.
- D'Odorico, S.; Peimbert, M. y Sabbadin, F. 1976, Astron. Astrophys. **47**, 341.
- Hawley, S.A. 1978, Astrophys. J. **224**, 417.
- Hesser, J.E.; Hartwick, F.D.A. y McClure, R.D. 1977, Astrophys. J. Suppl. **33**, 471.
- Janes, K.A. 1975, Astrophys. J. Suppl. **29**, 161.
- Janes, K.A. 1977, P.A.S.P. **89**, 576.
- Janes, K.A. 1979, Astrophys. J. Suppl. **39**, 135.
- Jennens, P.A. y Helfer, H.L. 1975, M.N.R.A.S. **172**, 701.
- Mayor, M. 1976, Astron. Astrophys. **48**, 301.
- Nandy, K.; Thompson, G.I.; Jamar, C.; Monfils, A. y Wilson, R. 1975, Astron. Astrophys. **44**, 195.
- Osborn, W. 1973, Astrophys. J. **186**, 725.

- Osborn, W. 1979, en "Problems of Calibration of Multicolour Photometric Systems", Ed. A.G.D. Philip, Dudley Obs., Schnectady, p. 115.
- Osborn, W. y Claria, J.J. 1976, en "Abundance Effects in Classification", Ed. B. Hauck y P.C. Keenan, Reidel Publ. Co., Dordrecht, p. 101.
- Osborn, W. y McClure, R.D. 1974, M.N.R.A.S. 189, 405.
- Peimbert, M.; Torres-Peimbert, S. y Rayo, J.F. 1978, Astrophys. 220, 516.
- Pilachowski, C.A.; Canterna, R. y Wallerstein, G. 1980, Astrophys. J. Lett. 235, L21.
- Schild, R.E. Astron. J. 82, 337.
- Smith, G.H. 1987, P.A.S.P. 99, 67.
- Whiteoak, J.B. 1966, Astrophys. J. 144, 305.
- Whitford, A.E. 1958, Astron. J. 63, 201.