

00372
4
2er

PARAMETROS DINAMICOS DE GALAXIAS ELIPTICAS

TESIS

que presenta

ELSA RECILLAS PISHMISH

a la Facultad de Ciencias de la
Universidad Nacional Autónoma de México
para optar por el Grado de
DOCTOR EN CIENCIAS (FISICA)

México, D.F. Enero de 1988

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

PARAMETROS DINAMICOS DE GALAXIAS ELIPTICAS

Indice

Capítulo I.	Introducción.	I-1
Capítulo II.	Propiedades y Relaciones Fundamentales en Galaxias Elípticas.	II-1
II.1.	Introducción.	II-1
II.2.	Relaciones entre Luminosidad, Radio y Brillo Superficial.	II-1
a)	Dependencia del r_e , M_V y brillo superficial.	II-1
b)	Leyes de distribución del brillo superficial.	II-7
II.3.	Relaciones Entre el Radio, la Morfología y la Densidad Ambiental.	II-11
a)	Variación de r_e versus la densidad ambiental.	II-11
b)	Relación entre el tipo morfológico y la densidad ambiental.	II-13
c)	La densidad ambiental y el contenido de gas neutro y ionizado.	II-15
II.4.	Relaciones entre Luminosidad Total, Color y Metalicidad.	II-17
a)	Relaciones color-color.	II-17
b)	Relación color-luminosidad y color-apertura.	II-19
c)	Efectos de metalicidad versus luminosidad y color.	II-19
II.5.	Relaciones Entre Luminosidad y Velocidades de Dispersión y Rotación. M/L versus L .	II-26
a)	Relación luminosidad versus dispersión de velocidades.	II-26
b)	La rotación en galaxias elípticas y el cociente V/σ .	II-28
c)	Relación luminosidad, dispersión de velocidades y brillo superficial.	II-29
d)	Cociente M/L versus L .	II-31
e)	Elípticidad e	II-35
	Referencias.	II-40
Capítulo III.	Sobre una Relación Entre el Radio, Luminosidad, Brillo Superficial y Densidad Local Proyectada de Galaxias.	III-1
III.1.	Introducción.	III-1
III.2.	La Relación Observada Entre el Radio,	

la Luminosidad y el Brillo Superficial.	III-4
III.3. Variación Ambiental del Radio en Galaxias Elípticas.	III-20
III.4. Galaxias en Medios Densos.	III-26
a) Distribución de brillos superficiales.	III-26
b) Variación real del radio efectivo con la densidad.	III-26
III.5. Discusión.	III-32
Referencias.	III-36

Capítulo IV. Propiedades Dinámicas y Características Fotométricas de Galaxias Elípticas en el Cúmulo de Coma.

IV.1. Introducción.	IV-2
IV.2. Obtención y Análisis de los Datos.	IV-5
a) Las observaciones.	IV-5
b) Correcciones K y de enrojecimiento.	IV-7
IV.3. Relaciones Color-Color en el Cercano Infrarrojo.	IV-8
a) Diagrama (J-H) vs. (H-K).	IV-8
b) (J-K).	IV-14
IV.4. Luminosidad versus Color.	IV-14
a) Diagramas (J-H), (H-K) y (J-K) versus K .	IV-14
b) Diagrama (U-K) versus K .	IV-16
c) Diagrama (V-K) _{-0.3} versus K -0.3.	IV-22
d) Relación de la luminosidad total versus el índice M_g .	IV-26
e) Los colores en el cercano IR versus densidad superficial de galaxias.	IV-26
f) Los colores en el cercano IR versus la elipticidad.	IV-30
IV.5. Relaciones $L-\sigma$ y $L-\sigma-I_e$.	IV-31
a) La relación $L \propto \sigma^{\alpha}$ en el cercano infrarrojo.	IV-31
b) La relación $L \propto \sigma^{\alpha} I_e^{-\beta}$ en el cercano infrarrojo.	IV-42
IV.6. Dependencia de la Relación M/L, L y Brillo Superficial.	IV-46
¿Es M/L función de L?	IV-46
IV.7. Discusión.	IV-50
Referencias.	IV-53

Capítulo V. Cúmulos de Galaxias y Formación de Galaxias: Coma y Virgo.

V.1. Introducción.	V-1
V.2. Observaciones en el Cercano Infrarrojo del Cúmulo de Virgo.	V-2
V.3. Diagramas Color-Color para las Galaxias de Virgo.	V-6
V.4. Relaciones Fundamentales en el Cúmulo de	

- Virgo.
- a) La estructura y la densidad ambiental en Virgo.
 - b) Relación L_{σ} y $L_{\sigma-I_{\sigma}}$.
 - c) Relación M/L en Coma y Virgo.
 - d) El índice M_{σ} versus la luminosidad en Virgo.
- Referencias.

V-6
V-8
V-12
V-21
V-22
V-25

Capítulo VI. Conclusiones.

VI-1

CAPITULO I

INTRODUCCION

Las galaxias elípticas constituyen una de las poblaciones de galaxias que se creía presentaban propiedades físicas y dinámicas muy semejantes entre sí. No faltó algún astrónomo notable que asegurara: "con ver una sola galaxia elíptica, se han visto todas". Afortunadamente, esto no ha sido así. La diversidad que ahora se reconoce tienen las galaxias elípticas, las hace motivo de nuevas e interesantes investigaciones que abarcan observaciones en todas las longitudes de onda y modelos y teorías de formación y evolución que han permitido extender el conocimiento de estos objetos extragalácticos en muy pocos años.

Las dificultades de observación de ciertos parámetros en galaxias elípticas, por ejemplo, las velocidades de rotación, han sido superadas con las nuevas técnicas de detectores bidimensionales. Estudios en el ultravioleta o el infrarrojo han permitido el análisis del espectro integrado y contribuyen al modelaje de las poblaciones estelares que conforman una galaxia elíptica.

Todo esto permite ahora intentar esquemas de formación de galaxias elípticas que procuren explicar el mayor número de propiedades y de relaciones entre parámetros estructurales y di-

námicos de las galaxias elípticas. Relaciones por ejemplo, entre la luminosidad y el radio efectivo, o bien entre la densidad ambiental y la morfología en cúmulos de galaxias y en el campo general.

Es por esto que nos hemos propuesto investigar las propiedades más importantes de las galaxias esferoidales en cúmulos de galaxias, para intentar descubrir cuál es el mecanismo que forma galaxias elípticas y eventualmente el de galaxias de todo tipo morfológico.

Las galaxias elípticas que se estudian en este trabajo, son todas miembros de cúmulos de diferentes densidades ambientales.

Los resultados de nuestras investigaciones en galaxias elípticas y SO, se han comparado con lo que se encuentra respecto de sus distribuciones de luminosidad, dispersión de velocidades, momentos angulares específicos, cocientes M/L , etc., que constituyen la información básica sobre los procesos de formación y evolución de galaxias.

Con todo lo que ahora se conoce de las propiedades estructurales y dinámicas de las galaxias elípticas, y los resultados que en esta tesis se presentan, se establece un esquema de caracterización de galaxias elípticas en el cual surgen una serie de preguntas fundamentales:

- 1) ¿Ha sido la formación de estrellas en galaxias elípticas más eficiente que en otro tipo morfológico de galaxias? Si esto es así, ¿son las galaxias elípticas "mergers": galaxias

producto de fusiones de galaxias de menor masa, como se ha planteado?

- 11) Siendo la energía cinética en galaxias elípticas, $\sigma_{dis} + \omega_{rot} = \omega \Omega_{grav}$. ¿Cuál es el papel de la velocidad de rotación ω_{rot} versus v_{dis} dispersión de velocidades. ¿Cuál es el papel que juega la densidad ambiental en este efecto?
- 111) Existe una relación densidad ambiental-morfología: ρ_{prev} versus morfología. Esta relación implica que la remoción de momento angular específico es más eficiente en regiones donde el torque es mayor (densidad ambiental mayor), en consecuencia, ¿ha sido la densidad ambiental el factor que hace más eficiente la remoción de momento angular específico y por lo tanto una formación estelar también más favorable?

Con estas interrogantes planteadas y con el propósito de hallar soluciones para algunas de ellas, nos propusimos inicialmente, analizar la evidencia existente de variaciones de parámetros estructurales con la densidad ambiental.

En el inicio del trabajo, Capítulo II, se describen las propiedades y relaciones observadas que se ha encontrado existen entre los parámetros físicos de galaxias elípticas, presentándose evidencia de propiedades que dependen de la densidad ambiental.

Motivados por esa evidencia, decidimos buscar otros efectos en donde la densidad fuese importante. Los resultados de este análisis de la variación de parámetros estructurales con la densidad ambiental en particular, la variación del radio efectivo de galaxias elípticas con la densidad ambiental en seis cúmulos

de galaxias, se presenta en el Capítulo III.

Para esto, se utilizaron datos de fotometría fotográfica en la banda R de radios efectivos, brillos superficiales, luminosidades y elipticidades de galaxias elípticas y SO, en seis cúmulos de galaxias obtenidos y reportados por los Strom.

La técnica aplicada a dichos datos de correlacionar los residuos con el brillo superficial (parámetro que se encontró reduce la dispersión en los datos) y con el radio efectivo, nos ha permitido encontrar un efecto de variación del radio efectivo con la densidad ambiental en el sentido de, a mayor densidad, menor radio efectivo de las galaxias elípticas. Se hizo el análisis en seis de los cúmulos descritos por los Strom, encontrándose una relación bien definida entre el radio típico de cada cúmulo o región, con la densidad local proyectada de galaxias. A partir de tal expresión se define una relación entre el radio efectivo, magnitud aparente y densidad ambiental que nos permite determinar distancias a las galaxias.

La variación ambiental de los radios efectivos que encontramos en los cúmulos de diverso grado de riqueza, nos sugirió entonces la idea de buscar variaciones similares entre los colores, elipticidades o bien algún otro parámetro que fuese observable en un gran número de galaxias elípticas.

En esta forma, iniciamos un extenso programa de obtención de la fotometría en el cercano infrarrojo de galaxias en cúmulos densos y de baja densidad, buscando precisamente efectos

ambientales sobre las luminosidades en el cercano infrarrojo de galaxias preferentemente elípticas y S0. En el Capítulo IV se describen la obtención, reducción y análisis de magnitudes y colores en el cercano infrarrojo, colectados en galaxias elípticas y S0 del cúmulo de Coma, un cúmulo muy denso y regular. Asimismo, en el Capítulo V se describen y analizan las observaciones de galaxias elípticas y S0, también en el cercano infrarrojo, del cúmulo de Virgo, y se establece una discusión comparativa de los resultados obtenidos en Coma y en Virgo. El cúmulo de Virgo es un cúmulo menos denso que Coma. Es evidente que las condiciones de densidad ambiental en ambos cúmulos, siendo diversas, nos permiten analizar si existen o no, variaciones como las que nos hemos propuesto encontrar.

Si bien, las correlaciones entre los colores en el cercano IR y la densidad ambiental así como con la elipticidad no fueron concluyentes, se encontraron relaciones muy fundamentales entre la luminosidad, la dispersión de velocidades, el brillo superficial y la densidad ambiental para el cercano infrarrojo. Estas relaciones muestran que existe una dependencia entre la luminosidad, la dispersión de velocidades y el brillo superficial, cuyas pendientes varían con la longitud de onda: en el cercano infrarrojo, las pendientes son más pronunciadas comparativamente a las pendientes determinadas en longitudes de onda en el azul o visible.

Al analizar estas mismas relaciones en el cúmulo de Virgo, se detectan diferencias en las pendientes de la misma relación,

que interpretamos como diferencias de sustentación en las galaxias elípticas, lo que indica que las condiciones ambientales que prevalecieron en Coma al momento de su formación, no han sido las mismas que privaban en el cúmulo de Virgo. La diferencia en densidad ambiental privilegió no solo la formación de un cierto tipo morfológico de galaxias sobre otro sino contribuyó a formar galaxias con un momento angular determinado por la densidad de torque.

En el Capítulo IV, se sugiere, a partir de la relación M/L y su comportamiento con la luminosidad y el brillo superficial tanto en el cúmulo de Coma como en Virgo, que las galaxias elípticas, tal vez con excepción de las CD, no se originaron de la fusión o "merging" de galaxias sino que son producto de condiciones ambientales y dinámicas que se observan ahora, y que han sido determinadas en el momento de su formación. Finalmente, las conclusiones a este trabajo, se resumen en el Capítulo VI.

CAPITULO 11

PROPIEDADES Y RELACIONES FUNDAMENTALES DE GALAXIAS ELIPTICAS

11.1 INTRODUCCION

En este capítulo se presentan las propiedades globales y relaciones entre parámetros estructurales, fotométricos y dinámicos que han sido encontradas en galaxias elípticas en los últimos años, y establecen que las galaxias elípticas forman un grupo de galaxias que pueden describirse en función de dos o tres parámetros estructurales. Esto sugiere una regularidad fundamental en el proceso de formación de galaxias. En el trabajo que se presenta en esta tesis, nos interesa hacer incapié en las relaciones que han surgido gradualmente en particular aquéllas que apuntan hacia efectos y correlaciones en los cuales las condiciones ambientales son importantes. Algunas de las relaciones aquí descritas y su posible explicación permitirán discriminar entre las teorías existentes de formación y evolución de galaxias elípticas.

11.2 RELACIONES ENTRE LUMINOSIDAD, RADIO Y BRILLO SUPERFICIAL

a) Dependencia de r_e y M_v y brillo superficial

Las galaxias elípticas se caracterizan por presentar una estructura que hasta hace algunos años se consideraba muy uniforme. Sin embargo cuando por primera vez se estudiaron sus

perfiles de luz con mayor resolución se encontró que había diferencias significativas en dichos perfiles. Estos presentaban un comportamiento que dependía de la luminosidad, M_V , de la galaxia. En otras palabras, no eran perfiles característicos de estructuras isotérmicas y la distribución de su luz que en principio representa una distribución de masa, mostraba diferencias complejas. Las propiedades intrínsecas a las galaxias de tipo esferoidal comenzaron a ser evidentes y estudios subsecuentes mostraron correlaciones entre los parámetros estructurales y dinámicos que dependían tanto de la luminosidad como de parámetros como el radio, el color, el brillo superficial la figuras de las galaxias, así como de la metalicidad y la densidad ambiental en el campo general.

Kormendy (1977) fué uno de los primeros en sugerir, al estudiar la distribución de brillos superficiales y los radios de galaxias elípticas luminosas, aisladas, que los radios efectivos, r_e (radio a la mitad de la luz de la galaxia) estaban correlacionados con la luminosidad de la galaxia. Es decir, las galaxias más luminosas mostraban radios efectivos, más grandes. En la Fig. II.1 se aprecia esta relación entre la magnitud absoluta en el azul, M_B y el log del radio efectivo en Kpc de una muestra de galaxias elípticas. La línea recta es el ajuste por mínimos cuadrados de los datos y que implica una correlación de la forma : $r_e \propto L^{0.38 \pm 0.03}$ (adaptado de Davies et al. 1983).

Por otro lado, Kormendy (1977) encontró también que los brillos superficiales, I_e , (en magnitudes por segundo de arco

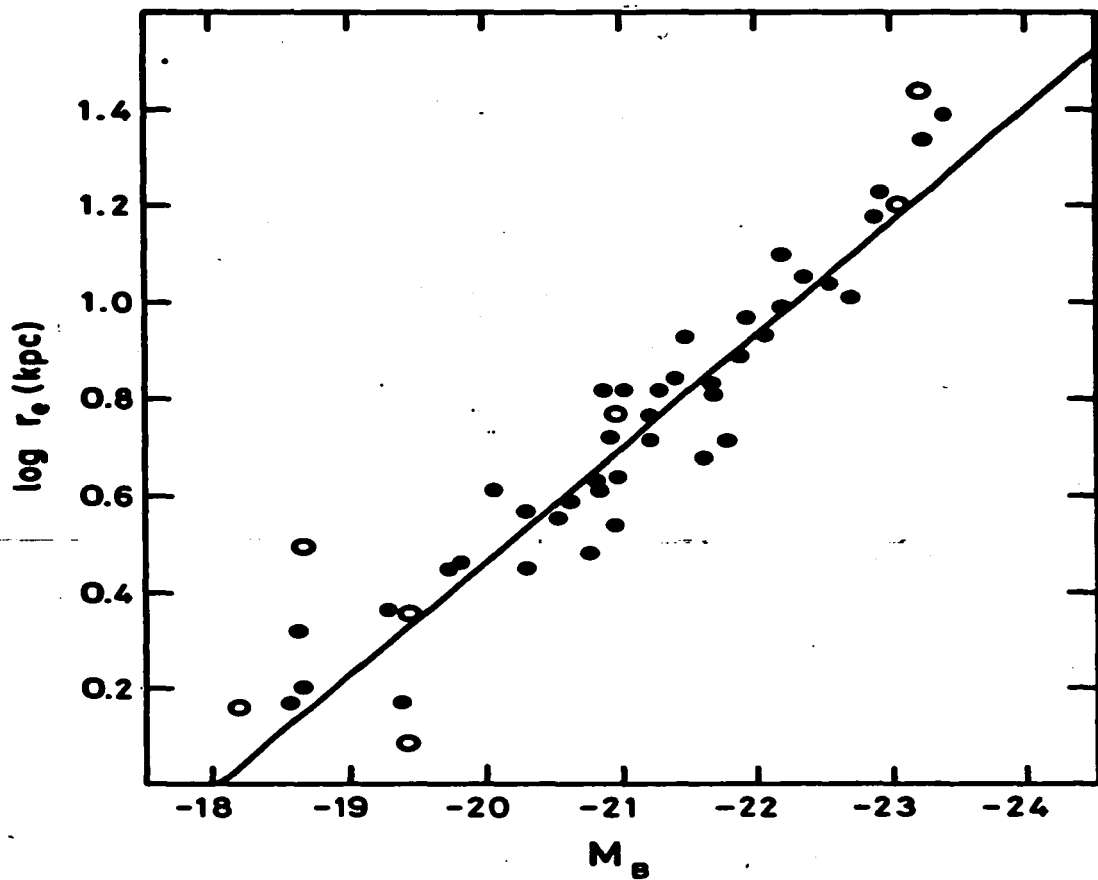


Figura II.1

cuadrado), estaban a su vez correlacionados con la luminosidad de las galaxias: mientras mayor era la luminosidad de la galaxia, menor era su brillo superficial (I_0 , al radio r_0). A su vez, las galaxias elípticas menos luminosas tenían un perfil de brillo superficial que caía más rápidamente con el radio, (no seguía una ley de de Vaucouleurs). En la Figura II.2a tomada de King (1978) se aprecian algunos de los perfiles de brillo superficial μ_0 para galaxias elípticas gigantes graficados contra $\log r$ en segundos de arco. El brillo superficial I_0 ($\mu_0 = -2.5 \log I_0$ magnitudes) de una galaxia luminosa cae más gradualmente con el radio que el perfil de una galaxia poco luminosa.

En la Fig. II.2b, se muestran los perfiles del modelo de King (Kormendy 1977). Las galaxias elípticas gigantes como las graficadas en la Fig. II.2a se ajustan a curvas con valores de c entre 2 y 2.35. La curva isotérmica, $c = \infty$, corresponde a los perfiles de brillo superficial de las galaxias "distendidas" de Kormendy, mientras que una galaxia de baja luminosidad se ajusta mejor a una curva de King $c = 0.75$. Esta tendencia, confirmada por la fotometría en las bandas U y R realizada por los Strom (Strom y Strom 1978 a, b, c) en al menos seis cúmulos de galaxias: Coma, Perseo, Abell 2199, Abell 1367, Abell 1228 y Hércules, revela nuevamente que en los sistemas de baja luminosidad la distribución de luz está más concentrada (se separa de una ley de de Vaucouleurs), es decir, existe un decremento sistemático de los radios efectivos hacia magnitudes absolutas más pequeñas. (Ver por ejemplo la Fig. 15 de Strom y Strom (1978a) para Coma o bien las Figs 1-6a de Recillas-Cruz y Serrano (1986) y Capítulo

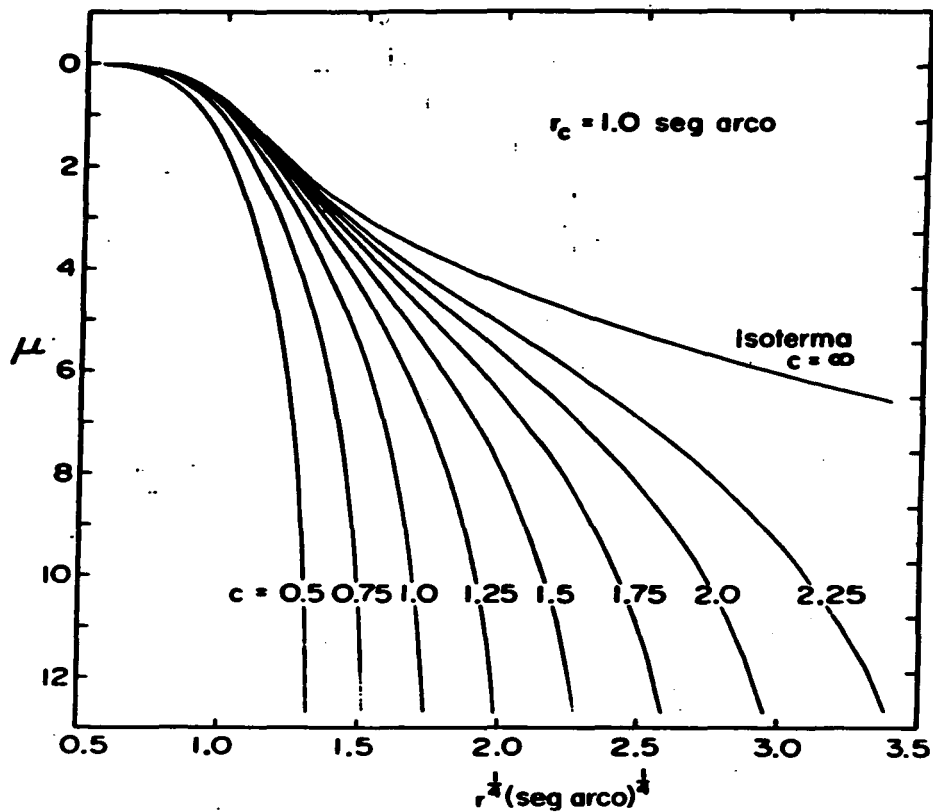


Figura II.2a

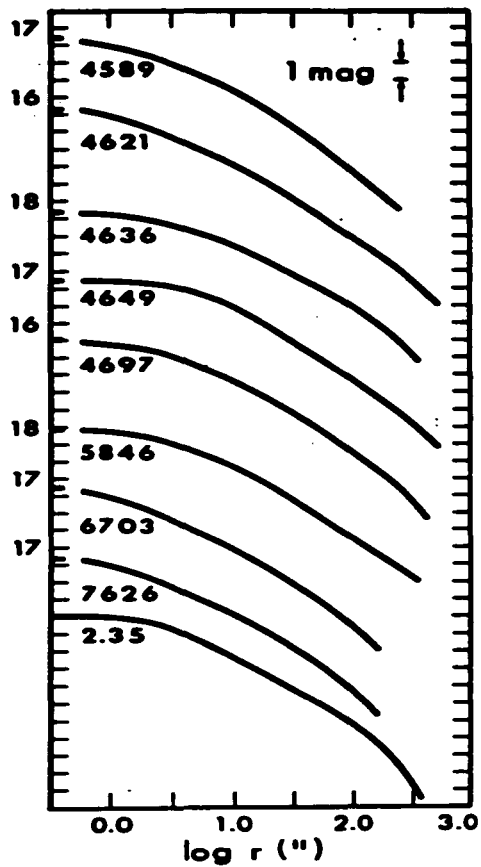
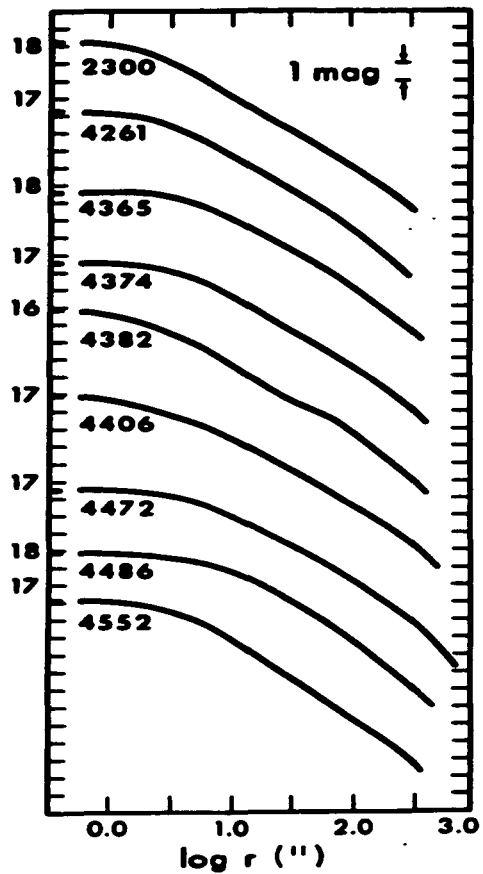


Figura II.2b

III).

La relación (r_e, M_v) que encuentran Oemler (1976), Kormendy (1977), los Strom, entre otros y más recientemente Davies, Efstathiou, Fall, Illingworth y Schechter (1983), Lauer (1985) y Djorgovsky y Davis (1987), parece apuntar hacia una relación no-universal entre r_e y M_v . Más adelante discutiremos estas diferencias proponiendo una relación más fundamental de tres parámetros, en donde la dispersión de los datos se disminuye drásticamente al introducir dos parámetros más, el brillo superficial y la densidad ambiental (de Vaucouleurs y Olson 1982, Recillas-Cruz y Serrano 1986 y Capítulo III) -densidad superficial local de galaxias- dependencia ya descrita en los trabajos de los Strom (1976a, b, c).

b) Leyes de distribución del brillo superficial

Por lo que respecta a los perfiles de Brillo superficial, I_e versus r , la distancia galactocéntrica de las galaxias, es posible interpretar a la mayoría de ellos con dos funciones analíticas sencillas como son principalmente, 1) la ley de Hubble (1930):

$$I(r) = \frac{I_0}{(r/\beta + 1)^2} \quad \text{II.1}$$

Aquí, I_0 es la intensidad central y β es el radio de la región central o núcleo, o bien como una 11) ley de de Vaucouleurs (1948, 1953) expresada de la siguiente manera:

$$\log (I/I_0) = -3.33 [(r/r_0)^{1/4} - 1] \quad \text{II.2}$$

donde r_e es el radio efectivo y I_e es el brillo superficial al radio r_e . La Fig. 11.3 representa el perfil de brillo de luminosidad de una galaxia elíptica gigante, NGC 3379, se aprecia el excelente ajuste de los puntos observados a la ley de $r^{1/4}$, de de Vaucouleurs.

Estudios posteriores (Oemler 1976, Kormendy 1977, King 1978, Kent 1985, Schombert 1987), han logrado extender la determinación de perfiles de luz a más bajos niveles de brillo superficial; para galaxias menos luminosas y para diversas condiciones ambientales y se ha encontrado que la distribución de luz de las galaxias elípticas se separa significativamente de una ley de Hubble y de de Vaucouleurs. Oemler (1976) en particular propuso una expresión modificada de la ley de Hubble, o ley de Hubble-truncada de la forma,

$$I(r) = [I_e / (r/\beta + 1)^2 \exp [-(r/\alpha)^2]] \quad 11.3$$

en un intento de reproducir el comportamiento del corte en la luminosidad que observaba en las galaxias de su muestra, introduciendo la exponencial y donde la luminosidad total está dada por:

$$I = I_e f(\alpha/\beta). \quad 11.4$$

Oemler estimó después de aplicar su función, que ciertas galaxias tampoco se ajustaban convenientemente a la ley dada por la expresión 11.3 (ver la Fig. 11.2a), y sí a un modelo de King (1966). Sin embargo, las familias de modelos desarrolladas por

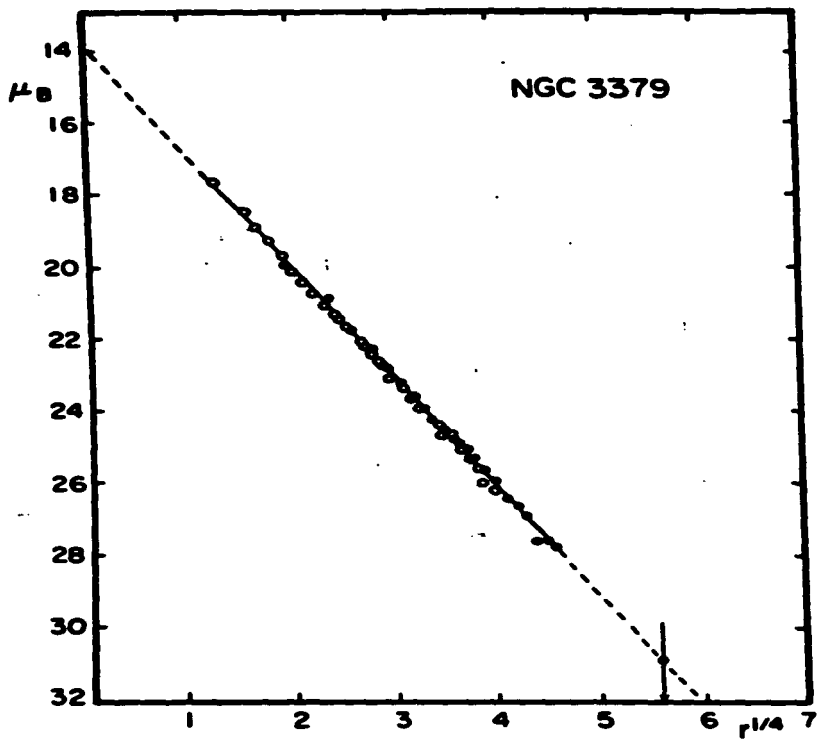


Figura II.3

King para reproducir principalmente las distribuciones de luz de los cúmulos globulares, tienen el inconveniente de no poder expresarlas con una sencilla fórmula analítica como las anteriores.

Más recientemente, Jaffe (1983) ha propuesto una función para describir la distribución tridimensional de la luz en galaxias esféricas que combina una distribución de densidad espacial que va como r^{-4} y r^{-2} , y donde la distribución espacial ϵ se define como:

$$\epsilon(r) = r^{-2} (1 + r)^{-2}/4\pi \quad \text{II.5}$$

en esta expresión el radio r es el radio normalizado a 1 al radio efectivo. Este radio es igual a $r_e/0.763$. Con esta ley de emisividad II.5, Jaffe (1983) sugiere que tanto los perfiles de luminosidad como aquéllos de la velocidad, se ajustan igual o mejor que con las leyes más utilizadas.

Kormendy (1977) ha discutido que si bien algunas de las leyes de distribución de luz pudieran ser más representativas del perfil de una galaxia elíptica a una luminosidad dada, todas las expresiones tienen la misma información física. La ley de de Vaucouleurs es entonces, una aproximación sencilla a la distribución de la luz en galaxias esféricas. En consecuencia, consideraremos razonablemente buena a la ley de de Vaucouleurs para la definición de los parámetros estructurales de galaxias. (Strom y Strom 1978a).

II.3 RELACIONES ENTRE EL RADIO, LA MORFOLOGIA Y LA DENSIDAD AMBIENTAL

a) Variación de r_e versus la densidad ambiental, ρ_{prev}

De los resultados más fundamentales, si bien poco reconocidos del trabajo de los Strom (Strom & Strom 1976a, b, c, Aguilar 1985), es el de la influencia del medio ambiente (densidad ambiental local de galaxias) sobre los parámetros estructurales de las galaxias. Los Strom encontraron que el radio efectivo, r_e , presentaba una tendencia a ser menor -a una luminosidad dada- en las regiones de mayor densidad que en las regiones de menor densidad; sean estas las regiones externas (por ejemplo a $r > 1$ Mpc en el caso de Perseo) de cúmulos densos, o bien en cúmulos poco densos, ricos en galaxias espirales, (Oemler 1974). En las Figuras II.4a y 4b de r_e versus M_B adaptadas de los Strom, es evidente que si bien la dispersión en los puntos graficados es muy grande, sí existe una tendencia a que los radios efectivos sean más pequeños a densidades mayores. En particular, en el diagrama de Coma West y Far West, se ha graficado la línea recta (discontinua) que representa la regresión para los datos de las galaxias en la región central y que se encuentra a radios menores de la regresión correspondiente a las galaxias en la parte externa de Coma.

En la discusión del Capítulo III, presentamos nuestros resultados (Recillas-Cruz y Serrano 1986), sobre la variación real del radio efectivo con la densidad ambiental, variación estructural que refleja las condiciones iniciales de las protogalaxias, en el momento de su formación.

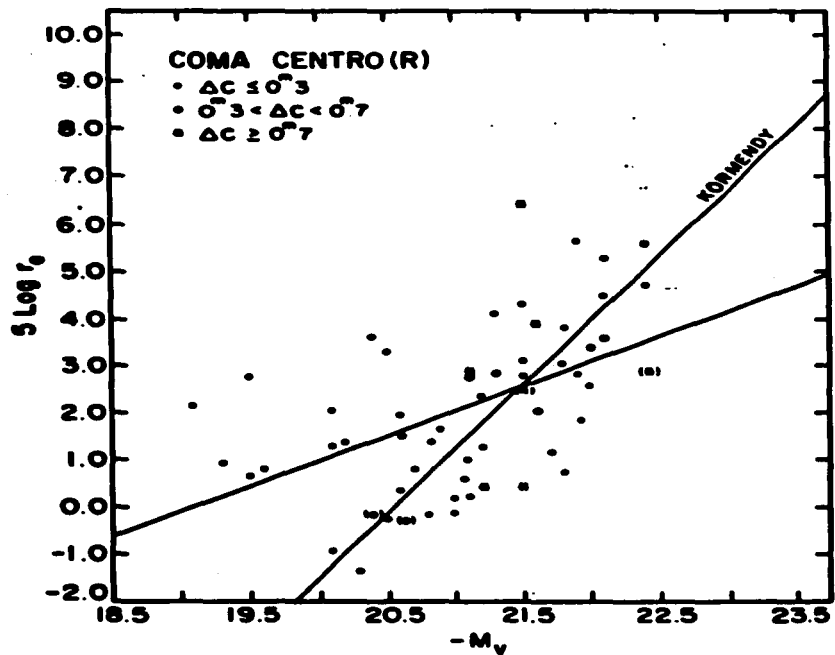


Figura II.4a

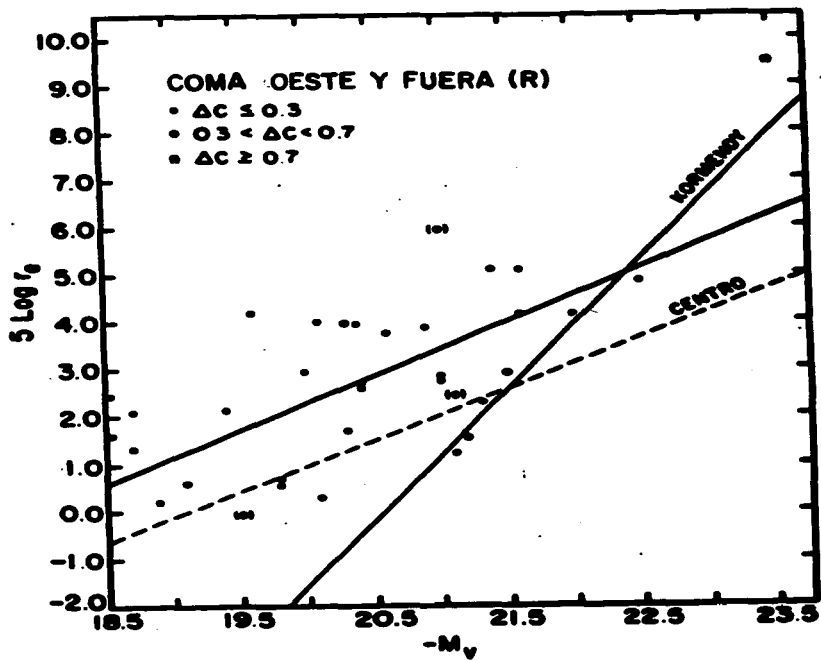


Figura II.4b

b) Relación entre el tipo morfológico y la densidad ambiental

Si bien los conteos iniciales de galaxias en cúmulos le dieron a Oemler (1974) el primer indicio de una relación entre la densidad local de galaxias y el "grado de riqueza" del cúmulo, no fué sino con el trabajo de Dressler (1980) en 55 cúmulos lejanos de galaxias que se logró cuantificar finalmente la relación.

Dressler (1980), estableció así los primeros resultados sistemáticos sobre la influencia de la densidad en la morfología en cúmulos de galaxias y en el campo general, demostrando que la densidad ambiental de galaxias, ha favorecido la formación de galaxias elípticas en medios más densos, mientras que no propicia aquélla de las espirales. En la Fig. II.5 (adaptada de Dressler 1980), encontramos el comportamiento gráfico de esta relación: a mayor densidad disminuye notablemente el número de galaxias espirales, mientras que el número de galaxias elípticas aumenta, al igual que el de las galaxias SO. En la parte superior del diagrama, se establece la relación entre la densidad proyectada y la población.

En particular en las regiones centrales de los cúmulos de galaxias, lugares donde la densidad es mayor, predominan las galaxias elípticas y son menos las galaxias espirales. Esto es claro en cúmulos como el de Coma (Abell 1656), muy denso y regular en el cual el número de galaxias elípticas es muy superior al de las galaxias espirales en las regiones centrales. Sólo se aprecian algunas galaxias espirales en las partes

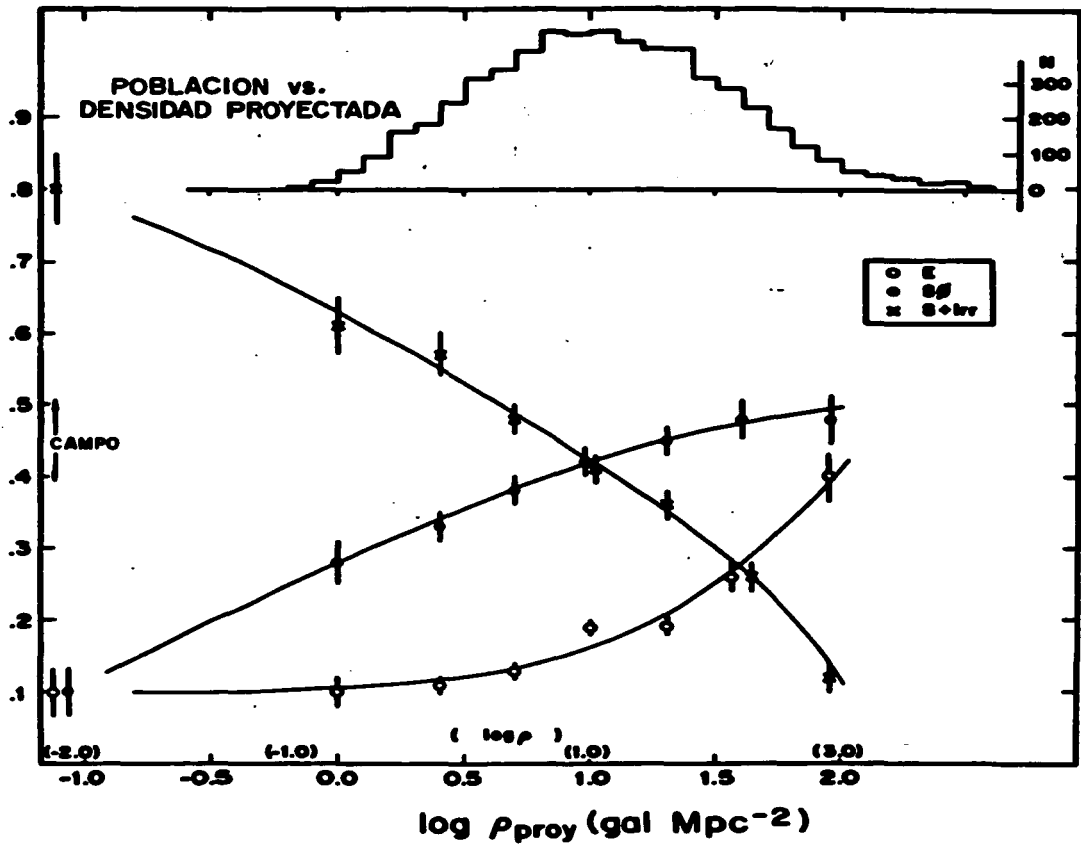


Figura II.5

externas del cúmulo, donde ya la densidad ambiental es substancialmente menor.

Recientemente, Binggeli, Tammann y Sandage (1987) han extendido la relación de Dressler, morfología versus densidad ambiental, al dominio de las galaxias elípticas enanas (dE) en el cúmulo de Virgo, demostrando que también se cumple para galaxias de menor luminosidad, galaxias que podrían tener propiedades distintas a las de galaxias más luminosas. Si bien Binggeli et al. dicen no hallar una explicación razonable para la existencia de esta relación fundamental, creemos que del estudio realizado en Coma y Virgo por nosotros en el cercano IR y que reportaremos en los siguientes capítulos en esta tesis, se sugiere que la densidad ambiental y el momento angular de la nube protogaláctica que dió origen al cúmulo, determinaron la morfología de la población de galaxias que se estaba formando, al igual que las diferencias estructurales de sus parámetros físicos.

c) La densidad ambiental y el contenido de gas neutro y ionizado.

Se ha establecido recientemente que aunque las galaxias elípticas se definían como carentes de gas ya fuese neutro o ionizado (y polvo), observaciones recientes en radio (HI) y ópticas de gas, líneas en emisión típicas de regiones de ionización, permiten asegurar que una buena parte de las galaxias elípticas contienen cantidades variables de gas a diversas temperaturas. Estudios recientes (Gallagher et al. 1977, Gisler 1978, Knapp et al. 1978, Kumm y Salpeter 1979, y Schweizer 1987)

han confirmado la presencia de gas caliente ($T > 10^6$), tibio ($\approx 10^4$), frío ($< 10^2$) y de polvo en galaxias elípticas.

Se ha estimado que entre el 10 y 15% de las galaxias elípticas tienen gas frío (Knapp et al. 1985) tal vez asociado al polvo de más baja temperatura, mientras que el gas ionizado (detectado por líneas en emisión de [OIII] o [NIII]) se ha detectado en al menos el 60%. En general el gas ionizado está asociado con un disco con frecuencia inclinado con respecto al eje principal de la galaxia, además de que rota más rápido que las estrellas de la galaxia, lo cual sugiere que el gas ha sido acretao y no proviene de las estrellas de la galaxia.

Gisler (1978) encontró que esta emisión se inhibía en las regiones densas de los cúmulos. Es decir, hay un efecto ambiental en la detección de la emisión del gas ionizado.

Por otro lado, la presencia y la intensidad de las líneas de emisión, están correlacionadas con la presencia de polvo y con la luminosidad en rayos-X, L_x , de la galaxia. Esto corrobora los resultados de Bancaill (1977) respecto de la luminosidad de rayos-X y el contenido galáctico en cúmulos galácticos, también un efecto ambiental: a menor densidad ambiental, mayor luminosidad L_x .

La emisión en rayos-X está correlacionada igualmente con la luminosidad de la galaxia y con la densidad ambiental. Las galaxias más luminosas tienen coronas de gas calientes que emiten en rayos-X que se extienden más allá de la galaxia óptica si

están en medios poco densos, (Trinchieri y Fabbiano 1985).

11.4 RELACIONES ENTRE LUMINOSIDAD TOTAL, COLOR Y METALICIDAD

a) Relaciones color-color.

Los colores integrados de galaxias elípticas y SO, están dominados principalmente por la luz proveniente de estrellas G y K gigantes. Estas son estrellas frías, tardías, cuyos colores son típicos de las estrellas que forman los núcleos ("bulges") de las galaxias espirales (Johnson 1966, Faber 1973). En nuestra galaxia, las estrellas que más se asemejan en temperatura efectiva y contenido metálico a las estrellas de las galaxias elípticas, son las gigantes K y M que se observan en la región de la "ventana de Baade" (Whitford 1978, Frogel y Whitford 1986), además de que es posible resolverlas; individuar la luz integrada del núcleo de la Galaxia en estrellas, no observables en los "bulges" de objetos extragalácticos. Evolutivamente, dichas estrellas se hallan en las etapas post-secuencia principal, en la rama gigante (Ciardullo y Demarque 1977).

El diagrama color-color ((U-V) vs. (B-V) en el ultravioleta y visible, o bien (J-H) vs (J-K) en el cercano IR), nos permite comprobar que los colores típicos de las galaxias elípticas son efectivamente los de estrellas tardías. En la Fig. II.6 tomada de Aaronson et al. (1981) se han graficado los colores (V-K), versus (u-V) para las galaxias elípticas y SO de Coma y Virgo. De hecho lo que miden los colores, en particular en el cercano IR, es la proporción de estrellas gigantes a enanas, si bien la

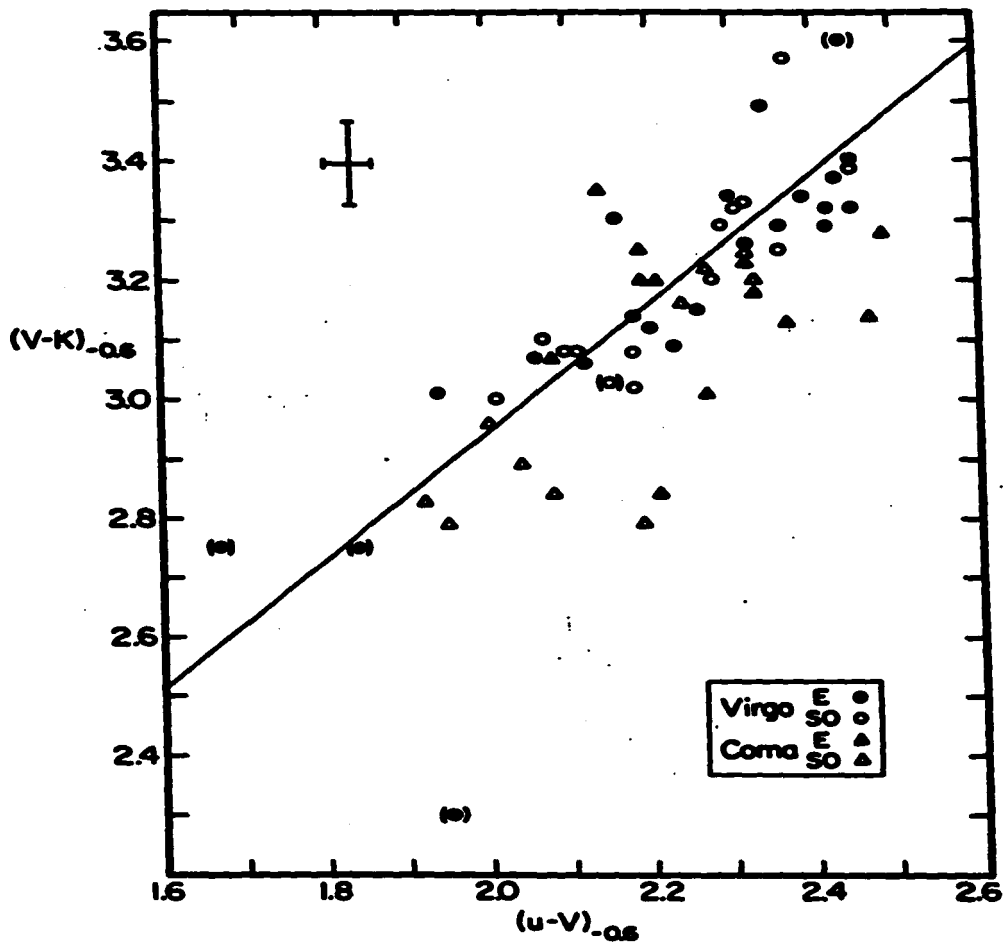


Figura II.6

luz de las enanas no contribuye mayormente al espectro integrado de las galaxias elípticas.

b) Relaciones color-luminosidad y color-apertura

Una relación bien conocida en galaxias elípticas es la relación color-luminosidad. Las galaxias elípticas más luminosas, tienen colores integrados que son más rojos en el visible (Sandage 1972, Visvanathan y Sandage 1977). En la Fig. II.7, es posible apreciar la variación sistemática de los colores de banda ancha, U, B, V y r de galaxias elípticas y S0 del campo general. Las relaciones color-magnitud nos dicen que las galaxias elípticas y S0 más luminosas son también las más rojas.

También se ha observado un efecto de variación del color de la galaxia con la apertura, es decir con el tamaño del diafragma que se utiliza al efectuar las observaciones fotométricas. La galaxia se vuelve más azul a medida que se observan sus regiones más externas; al aumentar el diámetro de la apertura (Sandage y Visvanathan 1978), (Fig. II.8). Este efecto de color-apertura, de ser real parecería sugerir que las galaxias elípticas son más rojas en las regiones centrales que en las partes exteriores. Observaciones recientes han permitido observar colores de galaxias elípticas hasta distancias galactocéntricas de 10 Kpc., y determinar de esta manera, gradientes de color.

c) Efectos de metalicidad versus luminosidad y color.

Se ha sugerido (Faber 1973) que tanto el efecto color-luminosidad como el de color-apertura implican que existe

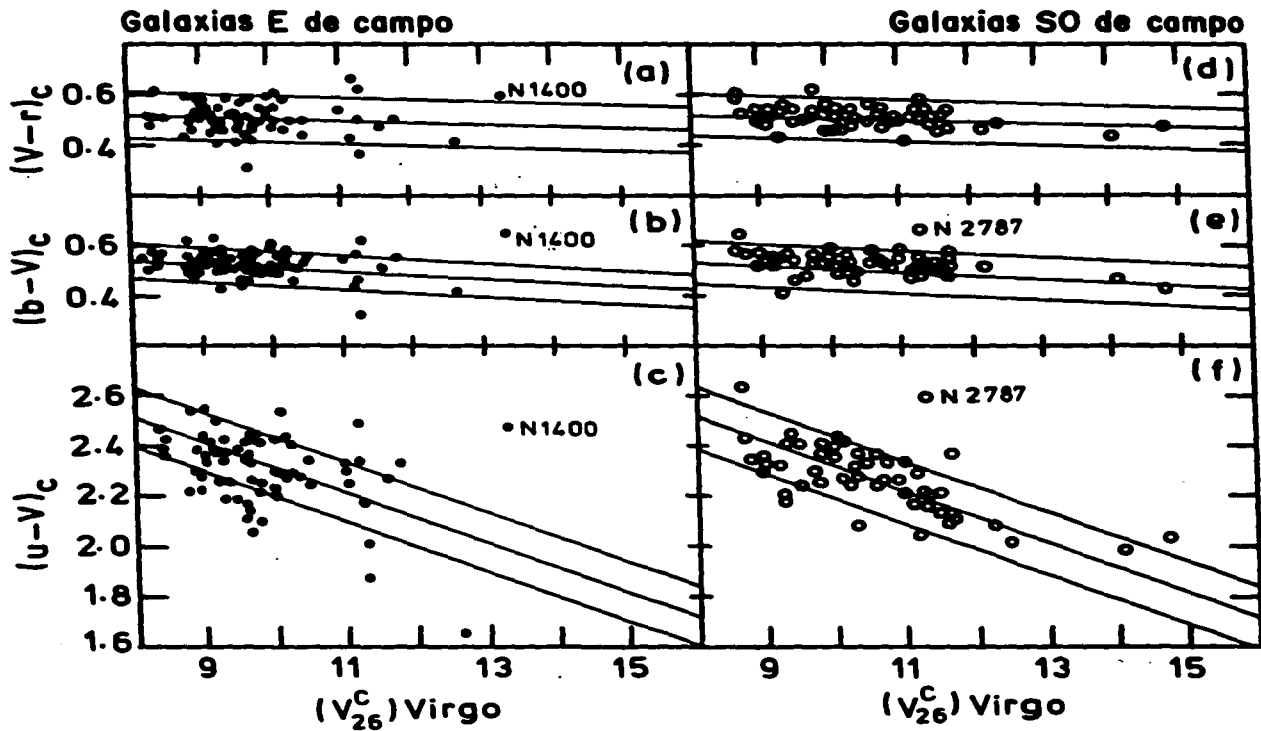


Figura II.7

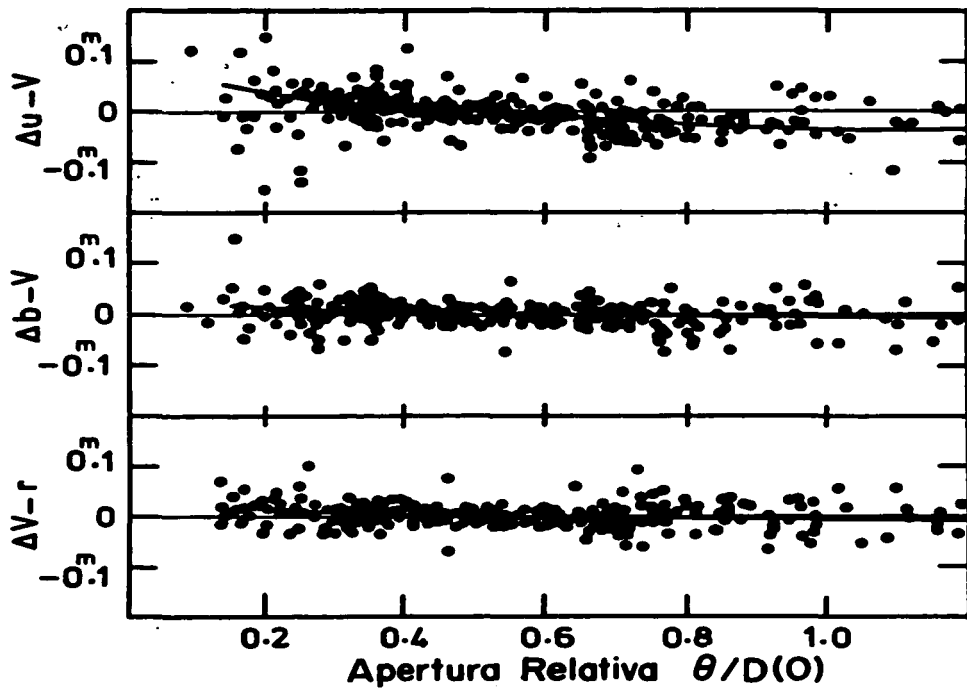


Figura II.8

una correlación entre la luz integrada de las galaxias tempranas, y para la que mostramos un espectro típico (Fig. II.9, tomado de Faber y Jackson 1976), con las bandas y líneas de absorción más comunes; y la metalicidad, semejante a la observada en cúmulos globulares y que se ilustra en la Fig. II.10 para cúmulos globulares galácticos (●) y en M31 (○), adaptada de Burstein et al. (1984) (Faber 1977, Aaronson et al. 1978, Burstein 1979, Aaronson et al. 1981). Otro efecto es el aumento en la intensidad de las líneas de absorción con la luminosidad: las galaxias más brillantes tienen líneas de absorción más intensas.

En las estrellas se ha observado que los colores están correlacionados con su metalicidad. De tal manera que en principio es posible interpretar los efectos de color-magnitud y color-apertura como una consecuencia de la variación de metalicidad, i.e., un gradiente de metalicidad en las estrellas de las galaxias elípticas. Sin embargo, si bien los efectos son importantes, (Mihalas y Binney 1981), los resultados en cúmulos globulares no son consistentes y por consiguiente los diagramas color-magnitud de las galaxias elípticas no tienen una interpretación simple. Puede tratarse tanto de un cambio en metalicidad con la distancia galactocéntrica o bien un cambio en la edad de la población estelar, temperatura efectiva o gravedad superficial.

Por otro lado, el comportamiento de algunos índices metálicos con la metalicidad, no se conoce bien; por ejemplo el índice Mg_2 que ha sido utilizado ampliamente, es muy sensible a la gravedad

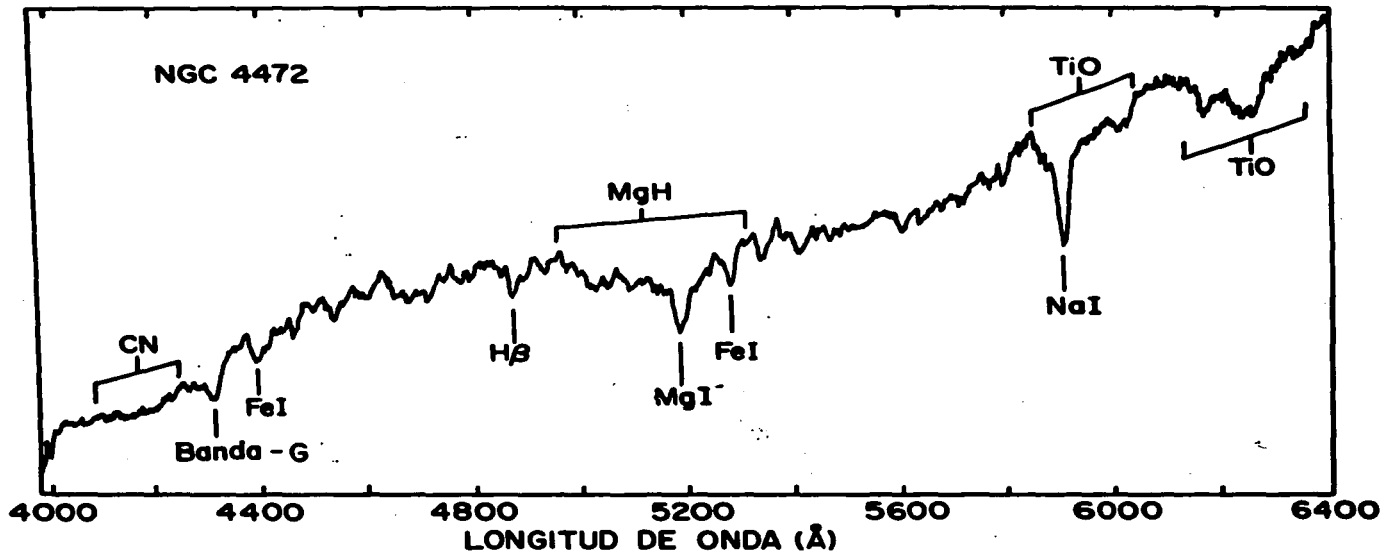


Figura II.9

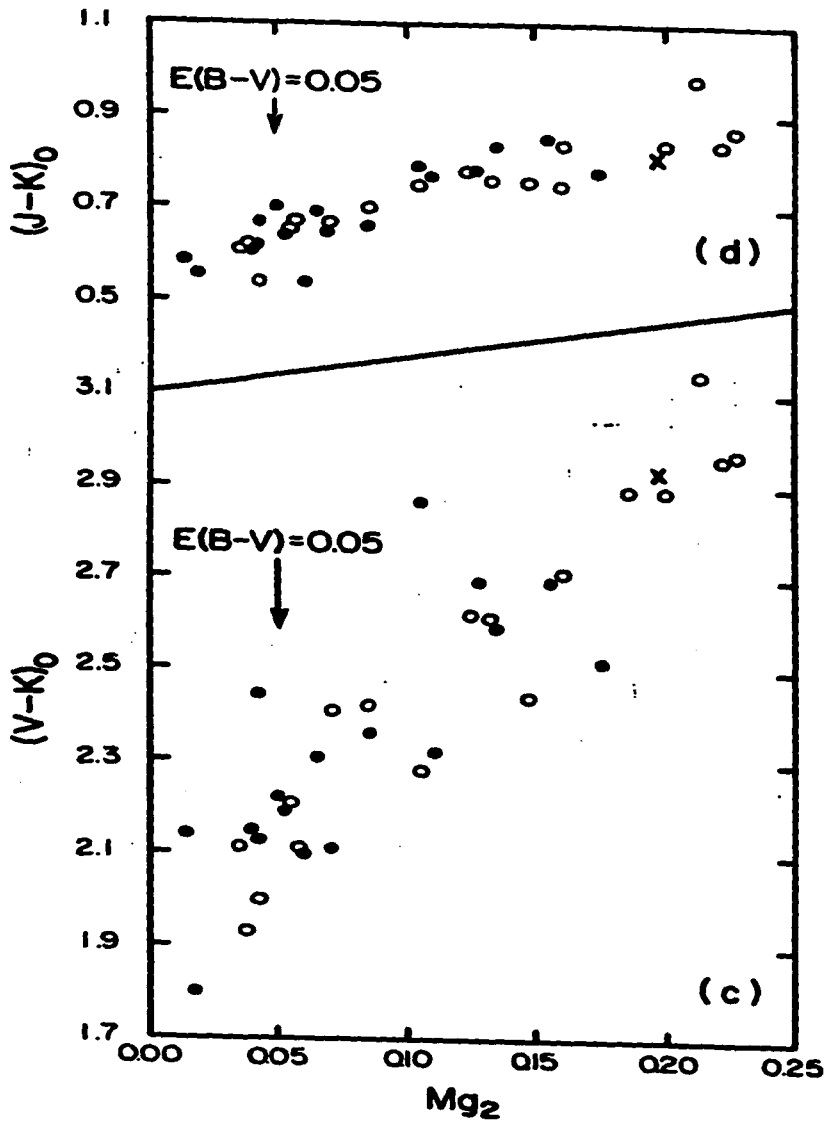


Figura II.10

superficial de las atmósferas estelares. Y a pesar de que el índice Mg_2 aumenta en intensidad con la metalicidad, la rama de las estrellas gigantes también se vuelve más roja, puesto que su temperatura efectiva baja y simultáneamente Mg_2 aumenta fuertemente con la caída en la temperatura.

El índice de metalicidad Mg_2 (Faber et al. 1977) es una medida de la abundancia de metales en las estrellas que dominan la luz de las galaxias elípticas y está correlacionado con la luminosidad de la galaxia como se ha demostrado en Terlevich, Davies, Faber y Burstein (1981). El índice Mg_2 mide la depresión, expresada en magnitudes, de la intensidad sobre la banda $\lambda\lambda 5157-5196 \text{ \AA}$ (en el sistema en reposo) con respecto a la línea del continuo trazado entre los puntos $\lambda\lambda 4898-4959 \text{ \AA}$ y $\lambda\lambda 5304-5356 \text{ \AA}$ (ver Fig. II.9). La profundidad central de la línea es debida al efecto combinado de la banda molecular del Mg H y del triplete del Mg I D y varía desde 0.10 magnitudes para estrellas deficientes en metales, hasta 0.35 magnitudes para las gigantes ricas en metales (Faber et al. 1977, Dressler 1984).

De los resultados de Faber y sus colaboradores, se establece una relación entre el valor del índice Mg_2 y la luminosidad de la galaxia elíptica, las galaxias más brillantes tienen índices Mg_2 de metalicidad mayores.

Este efecto es una consecuencia de la evolución de la población estelar en las galaxias elípticas. Las estrellas de población II pierden masa gradualmente; gas que tiende a caer

hacia el pozo de potencial de la galaxia donde eventualmente formará una generación de estrellas cuyo contenido de metales será mayor. Si la galaxia elíptica es muy masiva, retendrá una mayor cantidad de este gas, consecuentemente es de esperarse que las galaxias más luminosas presenten un mayor contenido de metales, y por lo tanto, sean más rojas en las regiones nucleares.

En el capítulo IV se utilizarán los valores del índice Mg_2 de galaxias elípticas estimados por Davies et al. (1987) para diversos cúmulos de galaxias y se establecerán relaciones entre los parámetros dinámicos y este índice de metalicidad. Es conveniente hacer notar que dicho índice y algunos otros no son muy representativos del contenido de metales en una galaxia elíptica (Burstein 1985), puesto que se establece una comparación que podría no ser válida, entre el comportamiento de índices metálicos en los cúmulos globulares cuya población de estrellas no tiene ni una metalicidad tan alta, ni un espectro de edades de estrellas tan diverso como el de una galaxia elíptica.

II.5 RELACIONES ENTRE LUMINOSIDAD Y VELOCIDADES DE DISPERSION Y ROTACION M/L VERSUS L

a) *Relación luminosidad versus dispersión de velocidades.*

Faber y Jackson (1976) derivaron una relación que ha producido resultados importantes (de Vaucouleurs y Olson 1962, Davies et al. 1983, Recillas-Cruz et al. 1987, Davies et al. 1987) en la comparación entre los parámetros dinámicos y la

luminosidad total de galaxias elípticas y "bulges", y que podría usarse como un indicador de distancia a galaxias externas, semejante a la relación encontrada por Tully-Fisher (1977) para galaxias espirales.

Faber y Jackson (1976) encontraron que la luminosidad y la dispersión de velocidades estaban correlacionadas como $L \propto \sigma^n$ donde $n = 4$, para una muestra de galaxias luminosas en el campo. Posteriormente, se evidenció que la relación variaba. Davies et al. (1983) y Dressler (1984) obtienen que la relación parecería ser $L \propto \sigma^3$ tanto en galaxias elípticas y de baja luminosidad, como en algunas galaxias elípticas miembros de los cúmulos de Coma y Virgo.

La relación entre la dispersión de velocidades y la luminosidad representa una medida de la masa contenida en la galaxia. Poveda (1958) encontró por primera vez una expresión para determinar masas galácticas usando los datos de la dispersión de velocidades en galaxias esferoidales, utilizando el teorema virial: $\sigma^2 \propto M/R$, donde M es la masa contenida dentro del radio R observado de la galaxia esferoidal.

La dispersión central de velocidades está determinada por el grado de anisotropía de las velocidades estelares en galaxias esferoidales y actualmente se determina utilizando técnicas de transformadas de Fourier para reducir espectros de alta resolución (Simkin 1974, Sargent et al. 1977, Schechter y Gunn 1980, Davies et al. 1983). Las velocidades de dispersión estelares ensanchan las líneas de absorción del espectro

integrado de galaxias elípticas y SO. Al comparar las transformadas respectivas de las galaxias con las correspondientes de estrellas K gigantes, usadas como patrón; el método permite encontrar la contribución del ensanchamiento de la línea de absorción tanto debida al efecto de la dispersión de velocidades, como al de la rotación.

b) La rotación en galaxias elípticas y el cociente v/σ .

La detección de las velocidades de rotación en galaxias elípticas hubo de esperar a que se desarrollaran técnicas observacionales más poderosas puesto que la ausencia de gas ionizado y neutro en cantidades substanciales, no permite usar las técnicas de determinación de velocidades de rotación (corrimientos de las líneas de emisión del gas) desarrolladas para galaxias espirales.

En 1975, Bertola y Cappacioli (1975), e Illingworth (1977), detectaron por primera vez, velocidades de rotación muy bajas en galaxias elípticas, en contradicción con las observaciones de galaxias axisimétricas, que deben su achatamiento a rotación. Ahora se acepta que las galaxias elípticas luminosas son figuras cuyo achatamiento es consecuencia de las diferencias de velocidades en los ejes principales de la galaxia: anisotropía de velocidades (Binney 1979, Mihalas y Binney 1981).

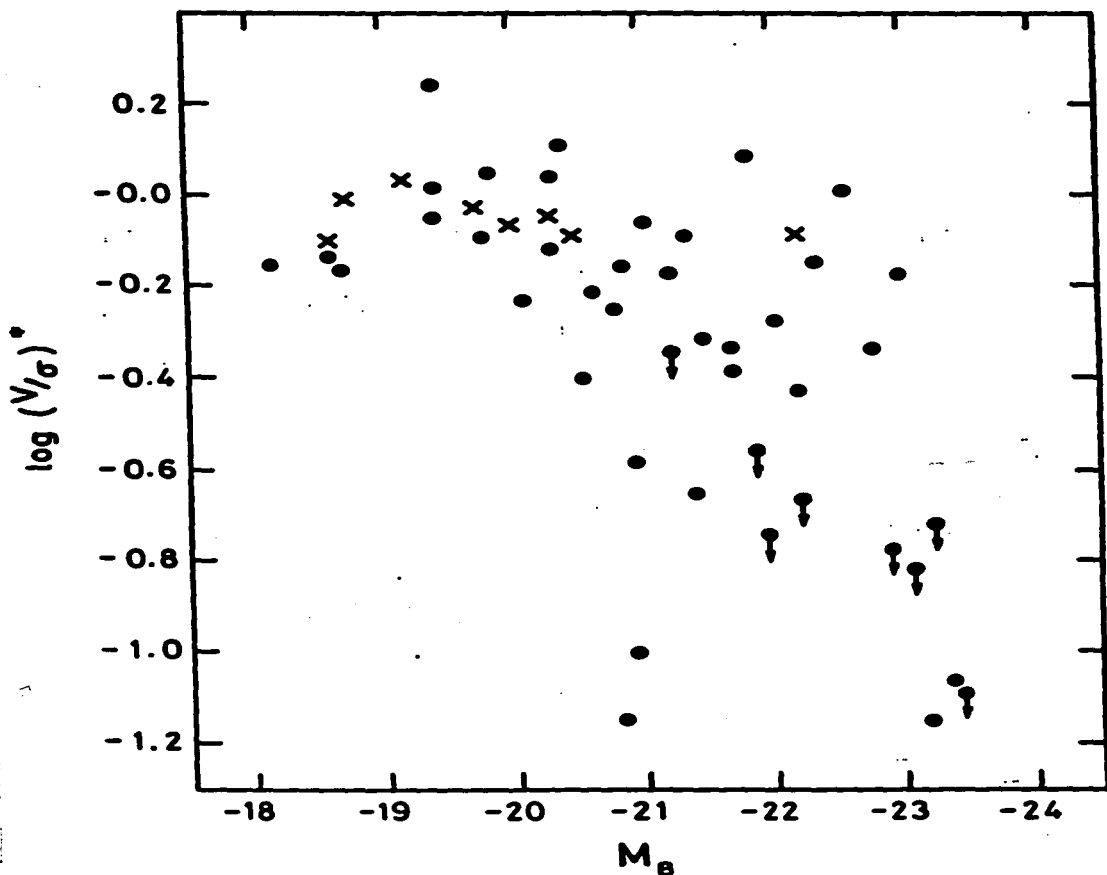
Posteriormente, en un estudio sobre la dispersión de velocidades en galaxias poco luminosas, Davies et al. (1983) dedujeron que ha pesar de que la rotación se correlacionaba

inversamente con la luminosidad, es decir, las galaxias más luminosas, como las estudiadas en la muestra de Illingworth (1977) y Faber y Jackson (1976) tenían muy bajas velocidades de rotación y altas dispersiones de velocidad, la muestra de galaxias de baja luminosidad presentaba velocidades de rotación sistemáticamente más grandes. Se aprecia esta variación en la Fig. II.11, donde se ha graficado el cociente v/σ versus M_B . v es la velocidad en el máximo de la curva de rotación, versus σ , la dispersión promedio.

Como se observa, los puntos que representan a las galaxias elípticas gigantes ($M_B < -20$), y las galaxias CD (círculos vacíos) de la muestra de Tonry (1985), se agrupan en la parte inferior derecha del diagrama. Las galaxias de baja luminosidad, (●) y los núcleos de galaxias espirales (x) se distribuyen por el contrario, más hacia valores mayores del cociente $\log(v/\sigma)$, lo cual implica mayores velocidades de rotación (y menor dispersión de velocidades). Consecuentemente, las galaxias más luminosas son figuras soportadas por presiones anisotrópicas y por lo tanto, son probablemente figuras triaxiales mientras que las galaxias menos luminosas, están sostenidas preferentemente por rotación.

c) Relación luminosidad, dispersión de velocidades y brillo superficial

La relación Faber-Jackson (1976) ha sido revisada y se ha encontrado que la correlación es más estrecha (menos dispersión en los datos), si se incluye al brillo superficial μ_s como un parámetro más (de Vaucouleurs y Olson 1982, Recillas-Cruz y



Serrano 1986, Dressler et al. 1987).

La expresión más general para la luminosidad total es por ende: $L \propto \sigma^\alpha I_e^{-\beta}$ donde α y β difieren de uno a otro autor. Djorgovsky y Davis (1987) en particular, han realizado una compilación de los tipos morfológicos, luminosidades, radios efectivos y brillos superficiales de ≈ 260 galaxias elípticas miembros de cúmulos y en el campo general y encuentran una relación entre el radio efectivo r_e e I_e a partir de la relación entre L , σ e I_e de la forma: $r_e \propto L^{0.4} I_e^{-0.55}$, expresión semejante a la obtenida por nosotros (Recillas-Cruz y Serrano 1986 y Capítulo III). Sin embargo, es muy importante hacer notar que la relación propuesta como "universal" por Dressler et al. (1987), no es tal, como se infiere de los resultados que presentamos en los capítulos siguientes (Recillas-Cruz, Carrasco y Serrano 1987). Los efectos ambientales que proponemos son determinantes en la formación de galaxias de una cierta morfología, dimensiones, grado de sustentación, brillo superficial etc. y estos efectos se aprecian sólo si, por ejemplo, el comportamiento de las relaciones arriba presentadas es analizado individualmente en cada cúmulo de galaxias.

d) Cociente M/L versus L

La determinación de relaciones M/L es importante por las implicaciones cuando se hacen suposiciones sobre la masa "invisible" en galaxias. De consideraciones dinámicas sobre el potencial en galaxias o bien en cúmulos de galaxias, se piensa

que debe existir masa oscura, es decir, masa que produce energía potencial mas no emite luz.

Poveda (1961) determinó una relación entre el cociente M/L y la masa total y encuentra una expresión $M/L \propto M^{0.32}$ representada en la Fig. II.12 en unidades de masas y luminosidades solares. Otras determinaciones de este cociente en función de la dispersión de velocidades, del radio y del brillo superficial centrales usando leyes diversas (King y Minkowski 1972), y dispersiones de velocidad σ , dan resultados donde $M/L \propto L^{-0.25-0.8}$, o bien $M/L_g \propto L^{1/2}$, como se muestra en la Fig. II.13 adaptada de Faber y Jackson (1976). La relación predicha basada en los datos de perfiles de brillo superficial y en la ley de potencia $L \propto \sigma^4$ es la línea recta.

A pesar de esta evidencia, Schechter (1980) encuentra que el cociente M/L no depende de la luminosidad. Kormendy (1987) en un trabajo reciente sobre núcleos ("bulges") de galaxias elípticas gigantes, encuentra $M/L \propto L^{0.2}$. Cabe mencionar que la mayoría de las determinaciones han utilizado luminosidades en el azul y el visual. Este efecto de variación del cociente M/L implica una variación de luminosidad con la metalicidad.

El estudio reciente en el cercano infrarrojo, que efectuamos en galaxias elípticas miembros de los cúmulos de Coma y Virgo, nos ha permitido reportar expresiones para cocientes M/L de galaxias elípticas (Recillas-Cruz et al. 1986), que se presentan en el capítulo IV de este trabajo.

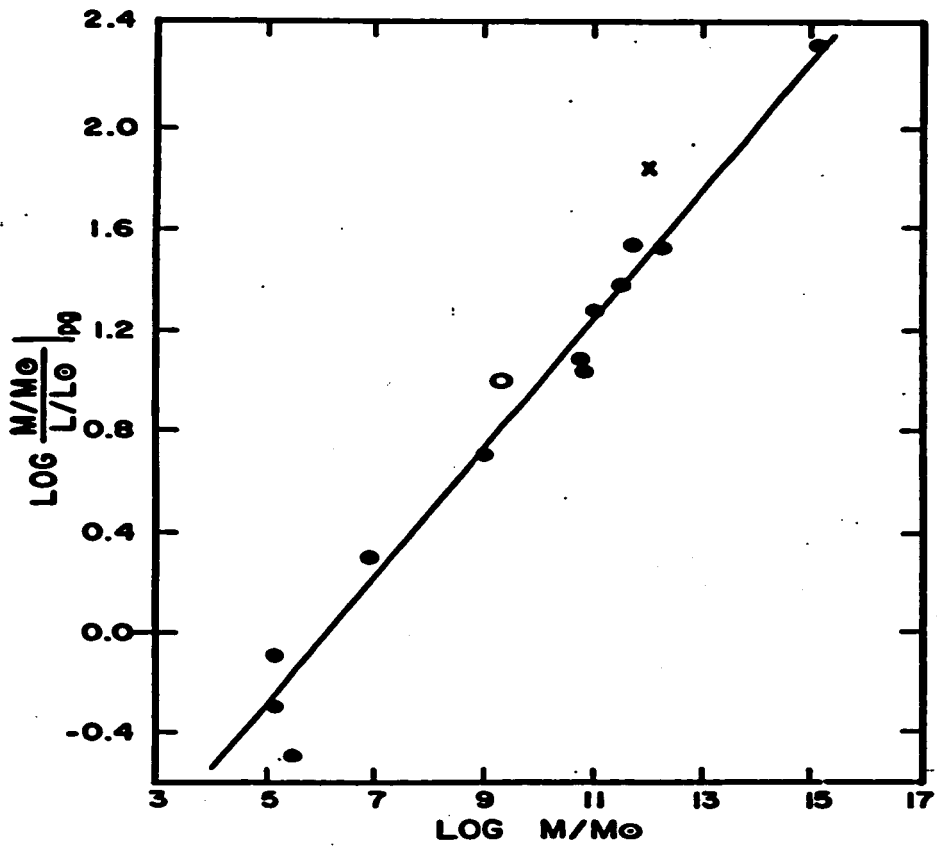


Figura II.12

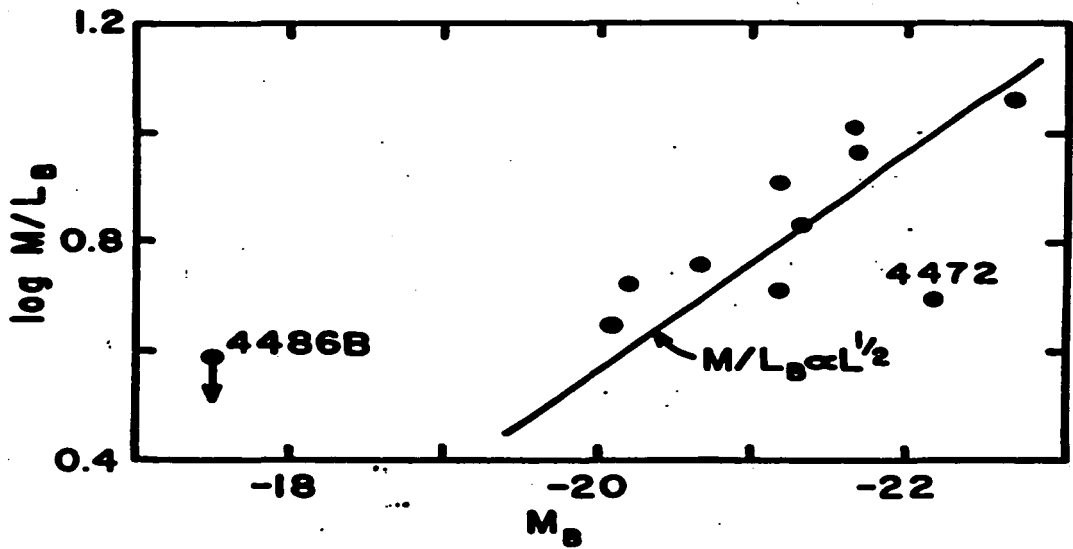


Figura II.13

e) *Elipticidad e.*

A diferencia de lo que ocurre con los radios efectivos de los sistemas elípticos, la distribución de elipticidades de las isofotas, no parece estar correlacionada con la luminosidad (Strom y Strom 1978a), es decir, los sistemas más luminosos no son, por ejemplo, los más redondos ($e \approx 0$). Esto último es lo que debería esperarse, si las galaxias se formaron según la teoría de los torques de marea (Thuan y Gott 1977). Este esquema de formación de galaxias predice que las galaxias más masivas (y más luminosas) que $M_v < -21.5$, tenderían a ser más redondas que en sistemas menos masivos. En el caso de que las galaxias estén en regiones más densas, las colisiones frecuentes galaxia-galaxia, producirán galaxias más redondas, (Richstone 1976). Sin embargo, esta predicción parece no cumplirse; se ha observado que no existen galaxias elípticas redondas en números significativos.

Como las galaxias son sistemas aún no relajados dinámicamente, es aún posible saber cuál fue la distribución inicial de estrellas o protoestrellas en una galaxia en formación, observando parámetros como las elipticidades y variaciones de la elipticidad en una misma galaxia. Así, es posible en principio, conocer cómo era la distribución inicial y la transferencia posterior del momento angular en una protogalaxia.

Strom y Strom (1978a, b, c) encontraron que las variaciones de elipticidad, tanto en la forma de las elipses como en particular la orientación de las mismas, ocurría en aproximadamente un 10%

de su muestra. Este comportamiento de la elipticidad que representa una "rotación" de las isofotas de una con respecto a la otra en el cielo, se muestra en la Figura II.14, (reproducida de los datos de Jedrzejewski 1987) en la cual, se aprecia la variación de e con el radio de las isofotas y la correspondiente variación del ángulo de posición A.P., del eje mayor de estas, de la galaxia NGC 1549.

Observaciones espectrofotométricas recientes realizadas con detectores CCD, (Lauer 1985, Djorgovsky 1986) de galaxias elípticas en un intervalo amplio de luminosidades y condiciones ambientales, indican que las variaciones de orientación de la isofota más interna respecto de la más externa, divididas en variaciones angulares importantes de $\approx 90^\circ$ y variaciones pequeñas de $\approx 10^\circ$; comprenden menos del 10% y más del 50% (Lauer 1986), respectivamente.

Es fundamental que se muestre que existen rotaciones importantes del eje mayor de las isofotas en galaxias elípticas, ya que esto es una indicación de que las figuras de estas galaxias no tienen un eje de rotación simétrico, es decir, son figuras triaxiales. Se piensa (Binney 1978, Williams y Schwarzschild 1979) que la rotación del eje mayor entre isofotas es una prueba de la triaxialidad de galaxias elípticas y de los núcleos ("bulges") de galaxias espirales, como en M31. De ser así, es importante saber en qué proporción estas galaxias son triaxiales y si las observaciones existentes permiten realmente detectar las rotaciones isofotales y por lo tanto la posible

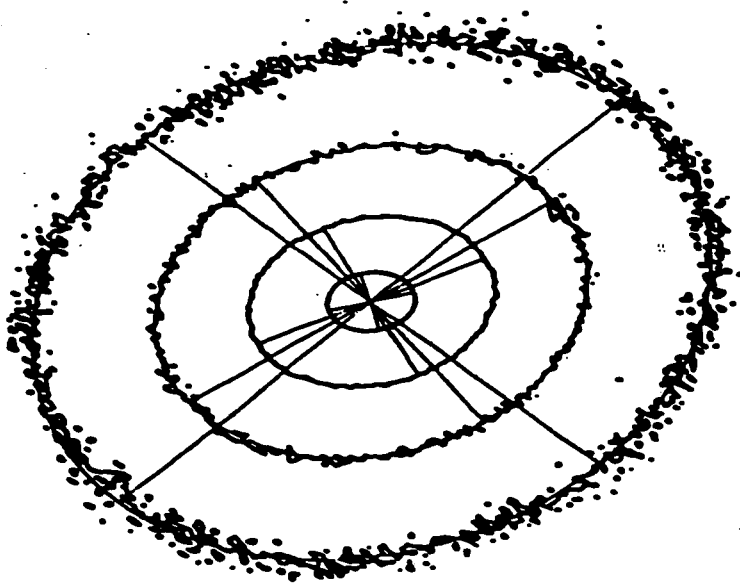


Figura II.14

traxialidad en una galaxia (Djorgovsky 1986). Resultados recientes hacen suponer que la rotación del eje mayor de las isofotas no es una condición suficiente de triaxialidad (Schechter 1987), es necesario también determinar si hay un gradiente de elipticidad de las isofotas internas a las externas.

Un resultado del estudio de la distribución de elipticidades es que el número de galaxias redondas sea aparentemente muy pequeño (Jedrezejewski 1987) o no existan del todo. Tampoco parecen existir las galaxias elípticas más achatadas que E7. ¿Porqué parecería más común formar galaxias que no son redondas o muy achatadas? Strom y Strom (1978a) encuentran una distribución de elipticidades cuya forma parece no depender de la densidad del medio, pero sí del achatamiento del cúmulo. En particular, en el cúmulo de Perseo, por ejemplo, (Strom y Strom 1978b), se encuentra que los ejes mayores de las isofotas de las galaxias más brillantes, están alineadas con el eje más elongado del cúmulo. Esta propiedad ya ha sido observada en otros cúmulos y parece ser un efecto real en cúmulos de galaxias.

Terlevich et al. 1981 han sugerido que la elipticidad es el "segundo" parámetro en la relación $L \propto \sigma$ y conjuntamente con los residuos de las intensidades de líneas metálicas establecen una relación, en la cual las galaxias elípticas más achatadas tienen velocidades de dispersión y metalicidades más pequeñas. Sin embargo, Dressler (1984) encuentra un efecto marginal al construir un diagrama similar para galaxias miembros de los cúmulos de Coma y Virgo, y sugiere que no hay tal correlación

entre la metalicidad residual y la razón de los radios en galaxias elípticas.

Curiosamente, la elipticidad no parece estar correlacionada fuertemente con ninguna de las propiedades físicas de las galaxias elípticas como pudieran ser la luminosidad, la densidad ambiental o la metalicidad.

CAPITULO II

REFERENCIAS.

- Aaronson, M., Persson, S.E. y Frogel, J.A. 1981, *Astrophys. J.*, 245, 18.
- Aaronson, M., Cohen, J.G., Mould, J. y Malkan, M. 1978, *Astrophys. J.*, 223, 824.
- Aguilar, L.A. 1985, Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley.
- Bahcall, N.A. 1977, *Astrophys. J.*, 216, L93.
- Bertola F. y Capaccioli, M. 1975, *Astrophys. J.*, 200, 439.
- Binggeli, B., Tammann, G.A. y Sandage, A. 1987, *Astron. J.*, 94, 251.
- Binney, J. 1978, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 183, 779.
- Burstein, D. 1979, *Astrophys. J.*, 232, 74.
- Burstein, D. 1985, *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 97, 89.
- Burstein, D., Faber, S.M., Gaskell, C.M. y Krumm, N. 1984, *Astrophys. J.*, 287, 586.
- Ciardullo, R. y Demarque, P. 1977, *Trans. Yale Univ. Obs.*, 33.
- de Vaucouleurs, G. 1948, *Ann. d'Ap.*, 11, 247.
- de Vaucouleurs, G. 1953, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, 113, 134.
- de Vaucouleurs, G. 1978, *Astrophys. J.*, 224, 14.
- de Vaucouleurs, G. y Olson, D.W. 1982, *Astrophys. J.*, 256, 346.
- Davies, R.L., Efsthathiou, G., Fall, S.M., Illingworth, G., y Schechter, P.L. 1983, *Astrophys. J.*, 266, 41.
- Djorgovsky, S. 1986, comunicación privada.
- Djorgovsky, S. y Davis, M. 1987, *Astrophys. J.*, 313, 59.
- Dressler, A. 1980, *Astrophys. J.*, 236, 351.
- Dressler, A. 1984, *Astrophys. J.*, 281, 512.

- Dressler, A., Lynden-Bell, D., Burstein, D., Davies, R.L., Faber, S.M., Terlevich, R.J. y Wegner, G. 1987, *Astrophys. J.*, 313, 42.
- Faber, S.M. 1973, *Astrophys. J.*, 179, 423.
- Faber, S.M. 1977, en *The Evolution of Galaxies and Stellar Populations*, B.M. Tinsley y R.B. Larson, (eds.). (New Haven: Yale University Observatory).
- Faber, S.M., Friel, E.D. Burstein, D. y Gaskell, C.M. 1985, *Astrophys. J. Suppl.*, 57, 711.
- Fogel, J.A. y Whitford, A.E. 1987, preprint.
- Gallagher, J.S., Knapp, G.R., Faber, S.M. y Balick, B. 1977, *Astrophys. J.*, 215, 463.
- Gisler, G.R. 1978, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 183, 633.
- Hubble, E. 1930, *Astrophys. J.*, 71, 231.
- Illingworth, G. 1977, *Astrophys. J.*, 218, L43.
- Jaffe, W. 1983, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 202, 995.
- Jedrzejewski, R.I. 1987, en *Structure and Dynamics of Elliptical Galaxies*, Proc. Simposio N° 127, UAI, T. de Zeeuw (ed.), Reidel Publs. Co., p. 37.
- Johnson, H.L. 1966, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 4, 193.
- King, I.R. 1966, *Astron. J.*, 71, 64.
- King, I.R. 1978, *Astrophys. J.*, 222, 1.
- King, I.R. y Minkowski, R. 1972, en *External Galaxies and Quasi-Stellar Objects*, UAI Simposio N° 44, (ed.) D.S. Evans (Dordrecht: Reidel), p87.
- Kent, S.M. 1985, *Astrophys. J. Suppl.*, 59, 115.
- Knapp, G.R., Gallagher, J.S. y Faber, S.M. 1978, *Astron. J.*, 83, 139.
- Kormendy, J. 1977, *Astrophys. J.*, 218, 333.
- Kormendy, J. 1987, en *Structure and Dynamics of Elliptical Galaxies*, Proc. Simposio N° 127, UAI, T. de Zeeuw (ed), Reidel Publs. Co., p. 17.
- Krumm, N. y Salpeter, E.E. 1979, *Astrophys. J.*, 227, 776.
- Lauer, T.R., 1985, *Astrophys. J.*, 292, 104.

- Lauer, T.R. 1986, comunicación privada.
- Mihalas, D. y Binney, J. 1981, *Galactic Astronomy: Structure and Kinematics*, W.H. Freeman & Co., San Francisco.
- Oemler, A., Jr. 1976, *Astrophys. J.*, 209, 693.
- Poveda, A. 1958, *Bol. Obs. Tonan. Tacubaya*, N° 17, 3.
- Poveda, A. 1961, *Astrophys. J.*, 134, 910.
- Recillas-Cruz y Serrano, A. 1986, en *Structure and Dynamics of Elliptical Galaxies*, Proc. Simposio N° 127, UAI, T. de Zeeuw (ed.), Reidel Publs. Co., p. 389.
- Recillas-Cruz, E., Carrasco, L. y Serrano, A. 1987, en preparación.
- Recillas-Cruz, Carrasco, L., Serrano, A. y Cruz-González, I. 1987, en preparación.
- Richstone, D. O. 1976, *Astrophys. J.*, 204, 642.
- Sandage, A. 1972, *Astrophys. J.*, 176, 21.
- Sandage, A. y Visvanathan, N. 1978, *Astrophys. J.*, 223, 707.
- Sargent, W.L.W., Schechter, P.L., Boksenberg, A. y Shortridge, K. 1977, *Astrophys. J.*, 212, 326.
- Schechter, P. 1976, *Astrophys. J.*, 203, 297.
- Schechter, P. 1980, *Astron. J.*, 85, 801.
- Schechter, P. 1987, en *Structure and Dynamics of Elliptical Galaxies*, Proc. Simposio N° 127, UAI, T. de Zeeuw (ed.), Reidel Publs. Co., p. 217.
- Schechter, P. y Gunn, J.E. 1979, *Astrophys. J.*, 229, 472.
- Serrano, A. 1986, comunicación privada.
- Schombert, J. 1986, *Astrophys. J. Suppl.*, 60, 603.
- Schweizer, F. 1987, en *Structure and Dynamics of Elliptical Galaxies*, Proc. Simposio N° 127, UAI, T. de Zeeuw (ed.), Reidel Publs. Co., p. 109.
- Simkin, S. 1974, *Astron. Astrophys.*, 31, 129.
- Strom, K.M., y Strom, S.E. 1978a, *Astron. J.*, 83, 73.
- Strom, S.E., y Strom, K.M. 1978b, *Astron. J.*, 83, 732.

Strom, K.M., y Strom, S.E. 1978c, *Astron. J.*, 83, 1293.
Thuan, T.X. y Gott, J.R. 1977, *Astrophys. J.*, 216, 194.
Tonry, J. 1985, *Astron. J.*, 90, 2431.
Trinchieri, G. y Fabbiano, G. 1985, *Astrophys. J.*, 296, 447.
Tully, R.B. y Fisher, J.R. 1977, *Astron. Astrophys.*, 54, 661.
Visvanathan, N. y Sandage, A. 1977, *Astrophys. J.*, 216, 214.
Williams, T.B. y Schwarzschild, M. 1979, *Astrophys. J.* 227, 56.
Whitford, A.E. 1978, *Astrophys. J.*, 226, 777.

CAPITULO III

SOBRE UNA RELACION ENTRE LA LUMINOSIDAD, BRILLO SUPERFICIAL, RADIO EFECTIVO Y DENSIDAD LOCAL PROYECTADA DE GALAXIAS.

En el presente capítulo, se presentarán los resultados de una investigación que nos ha permitido obtener una relación fundamental para galaxias elípticas, entre los parámetros estructurales tales como el radio efectivo y su relación entre la luminosidad, el brillo superficial y la densidad local proyectada en los cúmulos de galaxias.

III.1 INTRODUCCION.

Desde los trabajos pioneros de Hubble (1930), se conoce la naturaleza de la distribución de la luz-o brillo superficial- en las galaxias elípticas. Se ha establecido que los perfiles de luz siguen distribuciones muy regulares y similares de una galaxia elíptica a otra, lo que ha permitido describirlas con relaciones y expresiones analíticas relativamente sencillas, como se describieron en el Capítulo II.

Si suponemos que todas las galaxias tienen un perfil de luminosidad al que es posible ajustar una ley de de Vaucouleurs, uno debería esperar una relación entre el radio efectivo, r_e , la luminosidad L y el brillo I_e , de la forma:

$$L = k I_0 r_0^2$$

donde I_0 es el brillo superficial al radio efectivo r_0 , y k es una constante universal. Por otra parte puede ocurrir como ya se discutió en el Capítulo II que existan variaciones de la forma del perfil, variaciones producidas por cierta propiedad galáctica o por algún efecto ambiental. En éste caso, k no será más una constante y variará de acuerdo a los parámetros afectados. Kormendy (1977) ha encontrado por ejemplo, que las galaxias con compañeras luminosas y cercanas, están sensiblemente más "distendidas", es decir, por efectos de marea se encuentran más extendidas. El perfil del brillo superficial de dichas galaxias mostraba una desviación significativa de la distribución correspondiente a una ley de de Vaucouleurs. Schombert (1987) a su vez, encuentra desviaciones importantes de los perfiles de luz también con respecto a la ley de de Vaucouleurs, usando observaciones de fotometría CCD de un gran número de galaxias elípticas.

En el presente trabajo que describo en este capítulo, se pretende probar la hipótesis de un perfil universal para las galaxias elípticas en diferentes condiciones ambientales. Esto es, estableciendo que las diferencias que pudiera haber entre los perfiles observados y su descripción con una ley de de Vaucouleurs se deben muy probablemente, a algún tipo de interacción entre las galaxias y el medio ambiente en el que se encuentran. Para probar esta hipótesis, hemos analizado la relación entre el radio efectivo, la luminosidad y el brillo

superficial para galaxias elípticas que son miembros de cúmulos de galaxias de muy diverso grado de densidad ambiental, o riqueza (Abell 1958, Oemler 1974). Para este estudio, hemos tomado los datos publicados por Strom y Strom (1978a, b, c) que presentan una muestra muy homogénea de fotometría superficial en las bandas U y R para galaxias elípticas en seis cúmulos de galaxias. Los datos utilizados fueron los radios efectivos en la banda R, los brillos superficiales I_0 , también en R y las magnitudes absolutas M_v .

Los Strom confirmaron la relación entre la luminosidad de una galaxia elíptica y el radio efectivo. Las galaxias más luminosas tienden a tener radios efectivos más grandes (Kormendy 1977, ver también Capítulo II). Además, investigando esta relación para diferentes regiones de los cúmulos donde la densidad de galaxias era diferente, encontraron que los radios efectivos de galaxias situadas en regiones de alta densidad de galaxias, eran sistemáticamente más pequeños que los radios efectivos de galaxias situadas en regiones de baja densidad, fueran estas de cúmulos poco densos o bien de las partes exteriores de los cúmulos densos. En las figuras 15 y 16 de Strom y Strom (1978a) que muestran una gráfica de $\log r_{e,1}$ versus M_v para las galaxias elípticas del centro y de la periferia del cúmulo de Coma, es posible apreciar ambos efectos. Es este efecto ambiental reportado por los Strom que motivó el presente trabajo.

La relación M_v versus r_e , encontrada por los Strom, mostraba una dispersión mayor que los errores observacionales. Más aún, el efecto de variar el brillo superficial I_0 en la relación III.1

para diferentes galaxias, es el de aumentar la dispersión en la relación entre el radio y la luminosidad. Por esta razón decidimos explorar la posibilidad de que existiese una correlación entre el radio efectivo, la luminosidad y el brillo superficial de galaxias elípticas en diferentes cúmulos de galaxias.

Los resultados obtenidos se presentan en este capítulo, donde se discute la relación entre el radio, la luminosidad y el brillo superficial en cada cúmulo de galaxias. Se busca igualmente una variación de los radios de las galaxias elípticas como un efecto ambiental, y se discute la distribución del brillo superficial de las galaxias en diferentes medios ambientales y la relación correcta entre el radio efectivo y la densidad proyectada de galaxias. Finalmente se presenta una discusión general y se describe un nuevo método para determinar distancias a galaxias usando la relación entre la densidad ambiental y los parámetros estructurales de galaxias encontrada en este trabajo.

III.2 LA RELACION OBSERVADA ENTRE EL RADIO, LA LUMINOSIDAD Y EL BRILLO SUPERFICIAL.

El monumental trabajo de Strom y Strom (1978a, b, c) en seis cúmulos de galaxias cuyos datos han servido de base para la investigación reportada aquí, consistió en la obtención de la fotometría superficial en las bandas fotométricas U y R de 378 galaxias elípticas en los cúmulos de Coma (Abell 1626), Perseo (Abell 426), Abell 2199, Abell 1367, Abell 1226 y Hércules (Abell

2151). Encontraron, para cada galaxia, el mejor ajuste de de Vaucouleurs a sus perfiles observados obteniendo de ellos el radio efectivo de cada galaxia y el brillo superficial en las bandas U y R. La magnitud absoluta total M_v , para las galaxias, la determinaron usualmente integrando la luz en la banda R.

Siguiendo a Strom y Strom (1978a), consideramos que los datos en la banda R reflejan mejor las propiedades de la población estelar tardía dominante en las galaxias elípticas (ver capítulo II), en contraste con los datos en la banda U, que además está afectada por un efecto de "blanketing". Por lo tanto, hemos utilizado las magnitudes, radios y brillos superficiales medidos en la banda R de los Strom, para construir una regresión lineal de la forma:

$$\log r_e = a + b M_v \quad \text{III.2}$$

regresión semejante a la aplicada por los Strom a sus datos.

A continuación establecimos una regresión lineal de los residuos de los radios efectivos respecto de la primera regresión (radio calculado - radio observado) con el brillo superficial, I_e .

$$\Delta \log r_e = \log r_e - (a + b M_v) \quad \text{III.3}$$

de la forma,

$$\Delta \log r_e = c + d \mu_e \quad \text{III.4}$$

La muestra de los cúmulos centralmente concentrados y densos, como son Coma, Perseo y Abell 2199, se dividió en dos partes: una incluyó las regiones centrales y la otra, las regiones exteriores o periferia del cúmulo en cuestión. Las regiones centrales en los

cúmulos de Coma y Abell 2199, se definieron dentro de 1 Mpc del centro adoptado y dentro de 0.5 Mpc en el caso del cúmulo de Perseo. Dentro de estas regiones se separaron los datos de los radios, brillos superficiales y magnitudes de las galaxias identificadas como pertenecientes tanto a la región central como a la periferia. En el caso del cúmulo de Perseo se agruparon también independientemente, la muestra de galaxias llamadas de bajo brillo superficial (LSB), una clase de galaxias elípticas con un núcleo pequeño muy brillante y una envolvente de bajo brillo superficial descubiertas por los Strom (Strom y Strom 1978b).

En las Figuras III.1a a la III.6a, se presentan los diagramas de la relación $\log r_0$ versus M_r construídos para las galaxias de cada cúmulo. Los símbolos \odot corresponden a las galaxias en las regiones centrales (en aquellos cúmulos así separados) y los símbolos \circ a las galaxias fuera del centro. También se muestran las líneas del correspondiente mejor ajuste determinado por la ecuación III.2. Las líneas continúa y a trazos largos corresponde a las regiones centrales y en el caso de Coma, a la región Coma West, respectivamente, mientras que las líneas a trazos cortos se derivaron tomando conjuntamente las dos muestras. En las Figuras III.1b a la III.6b se ha graficado la relación entre los residuos: la expresión III.3 y de las Figuras III.1a a la III.6a versus el brillo superficial en la banda R, μ_r , para las galaxias de cada cúmulo. Los símbolos son los mismos que las Figuras III.1a a III.6a, y las regresiones corresponden a la expresión III.4. En los diagramas III.1a y III.1b para Coma, se eliminó la

galaxia SO, RB 234 denotada por x.

En las Figuras III.2a y III.2b correspondientes a Perseo, no están graficadas las galaxias LSB (de bajo brillo superficial). Los símbolos o corresponden en éste caso a las galaxias en la región exterior (> 0.5 Mpc). Las Figuras III.2c y III.2d son los diagramas respectivos para las galaxias LSB de Perseo.

En las Figuras III.3a y III.3b se han graficado los datos para el cúmulo Abell 2199; en este caso, los símbolos o denotan a las galaxias de la región exterior (> 1 Mpc) del cúmulo. De las Figuras III.4a y III.4b a III.6a y III.6b que corresponden a las muestras de los cúmulos Abell 1367, Abell 1228 y Hércules (Abell 2151), no se separaron entre galaxias centrales y externas.

Los coeficientes a, b de la regresión así como sus errores promedio se presentan en la Tabla III.1 para cada cúmulo y región dentro de los cúmulos. Los cúmulos han sido listados por orden decreciente de la densidad, Coma es el cúmulo más denso y regular, mientras que los cúmulos, Abell 1228 y Hércules, resultan ser los de menor densidad y de estructura considerablemente más irregular que Coma. De igual manera, los coeficientes c, d que se obtuvieron en la regresión III.4 y graficada en las Figuras III.1b a III.6a; con sus errores promedio se resumen en la Tabla III.2.

La inspección de las Figuras III.1b a la III.6b permite apreciar que ciertamente existe una relación entre los residuos y el brillo superficial μ_s y lo que es más importante, la

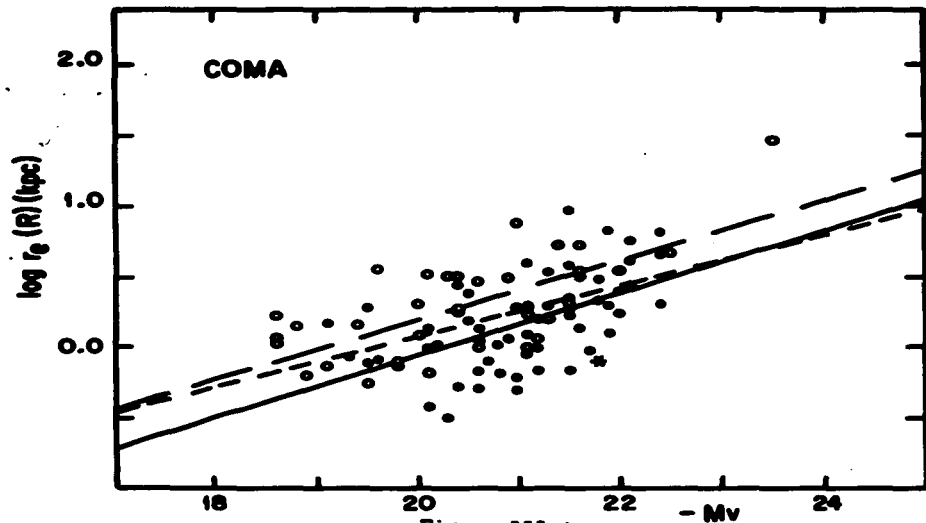


Figura III.1a

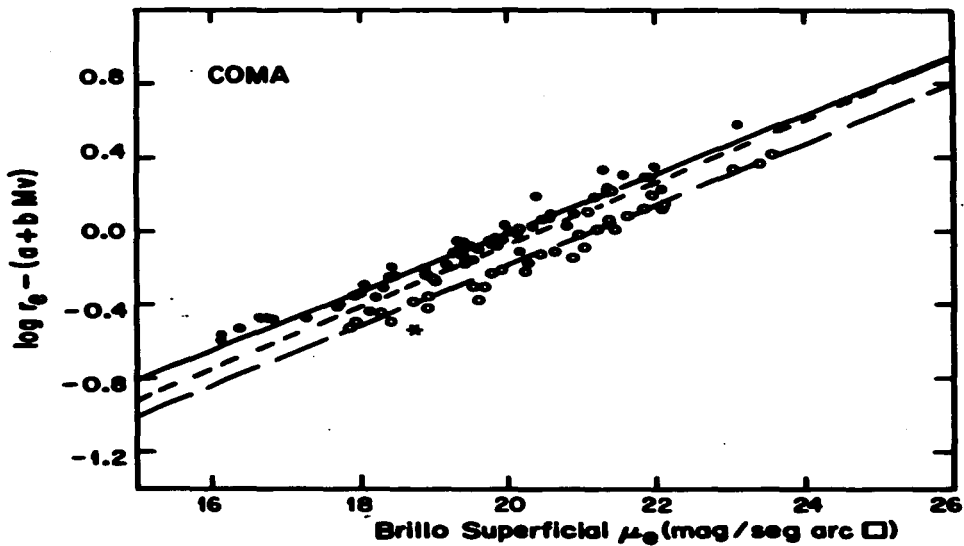
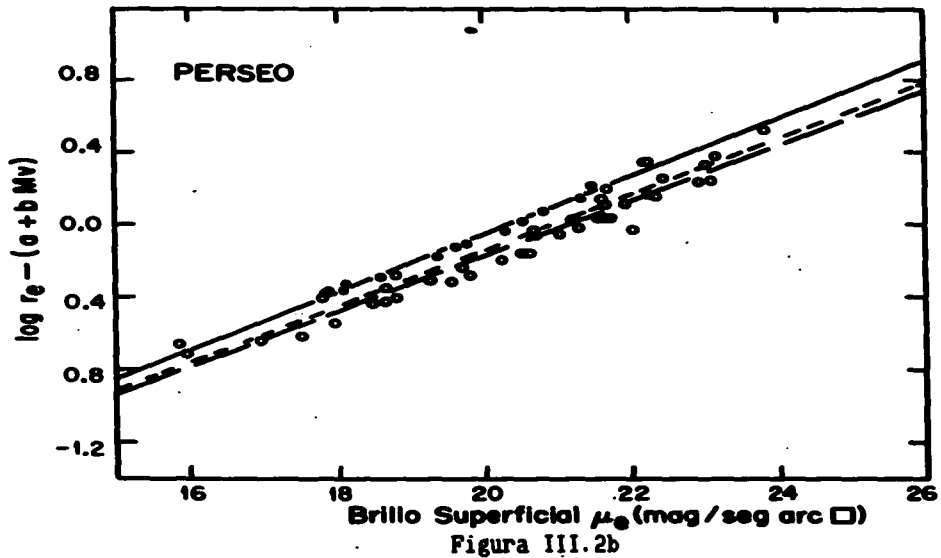
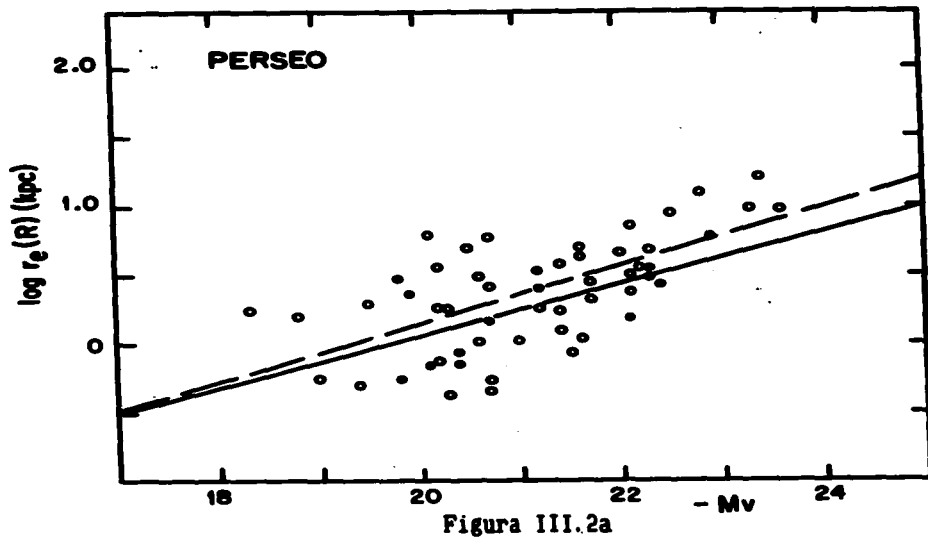
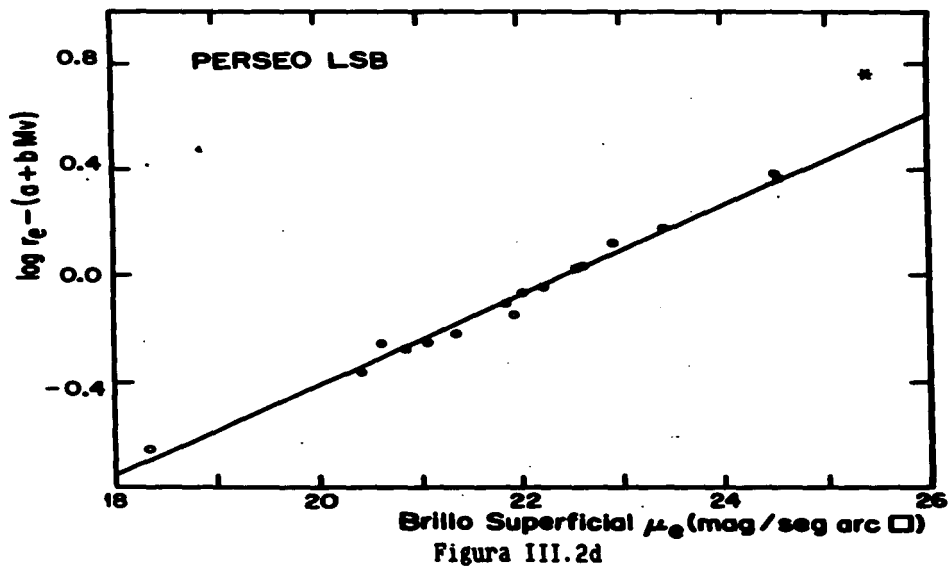
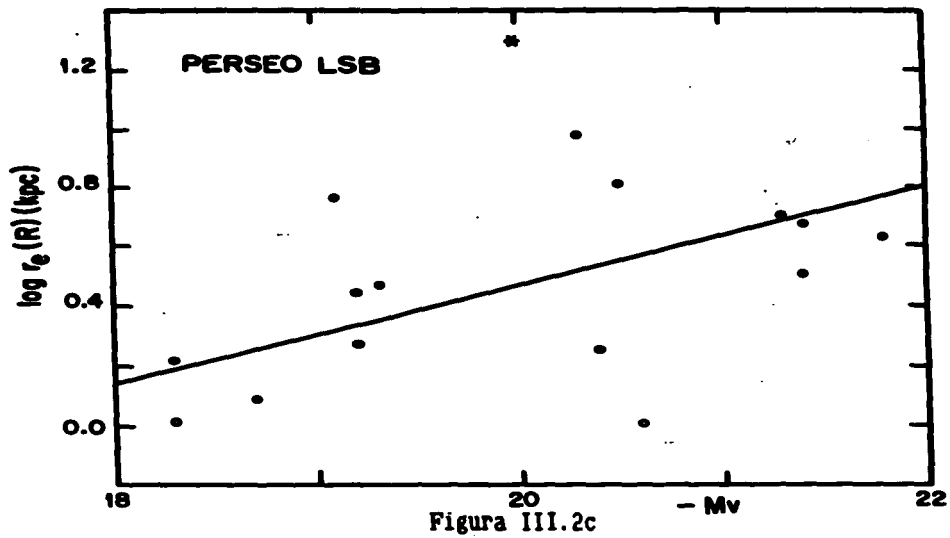
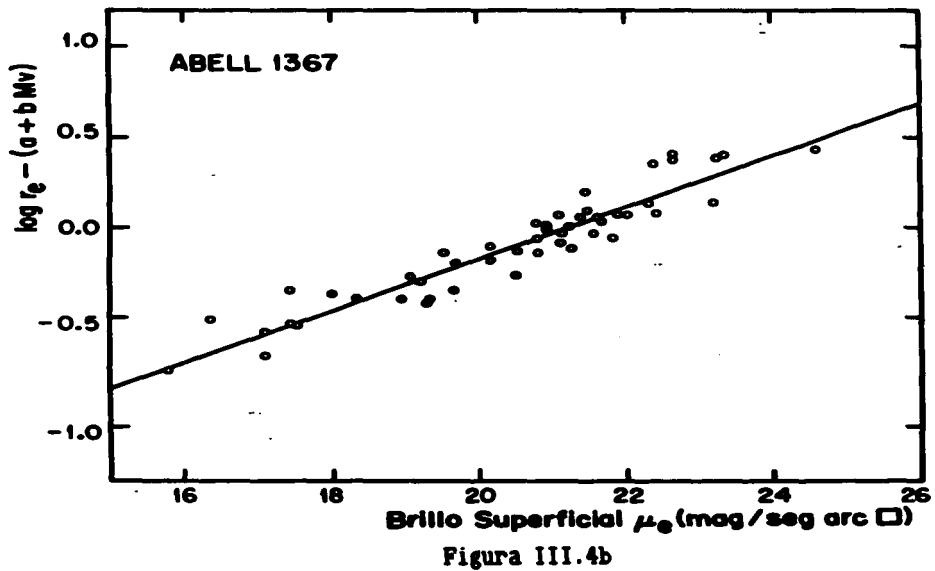
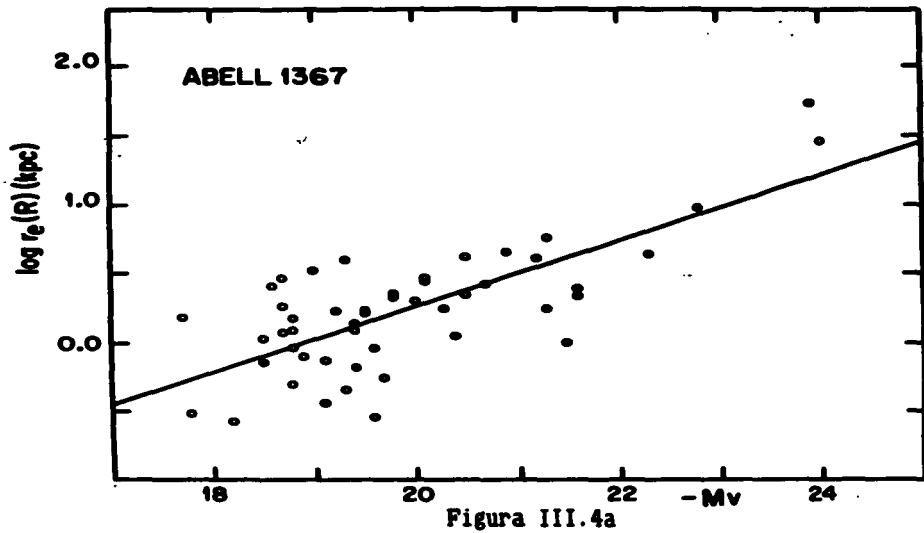
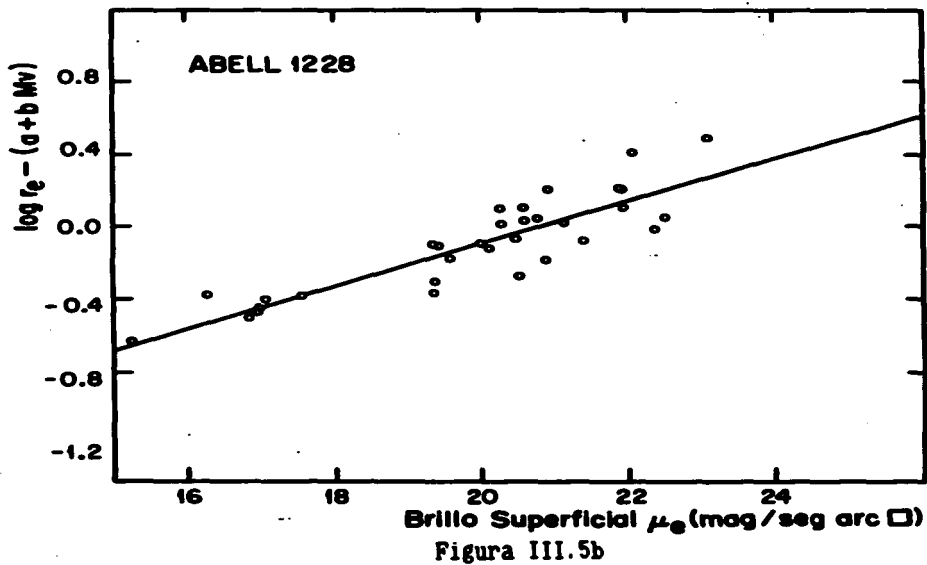
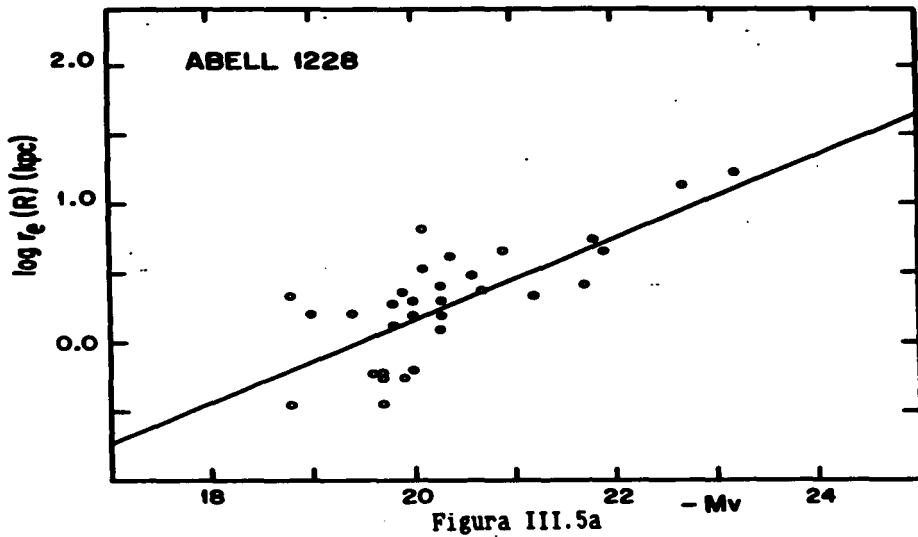


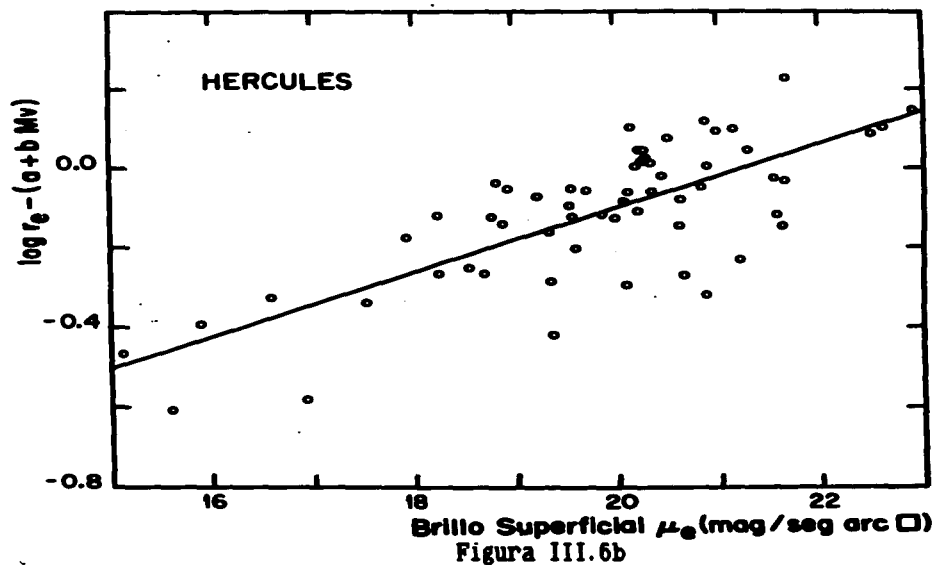
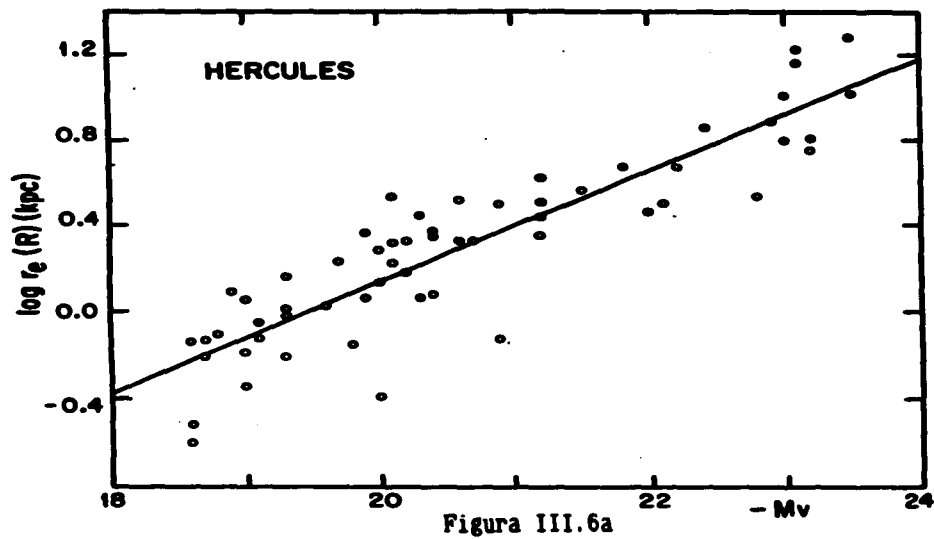
Figura III.1b











dispersión en los datos de esta relación, III.4, es mucho menor que la dispersión en la relación III.2 entre el radio efectivo y la luminosidad. En el caso de ésta última, la dispersión es 0.29 mientras que la correspondiente para la relación entre los residuos y μ_s es típicamente de 0.08. Únicamente dos galaxias: la galaxia SO, RB 234 en el cúmulo de Coma y la galaxia Per 110 de bajo brillo superficial en Perseo, están a más de 3 σ de sus valores medios y se excluyeron del cálculo de los coeficientes de la regresión.

De los resultados que se presentan en la Tabla III.1 y III.2, es difícil estimar el efecto ambiental sobre las relaciones que se discuten. Por citar un ejemplo, el coeficiente b del término en la luminosidad es sistemáticamente mayor en valor absoluto para las regiones de baja densidad de galaxias (regiones externas en los cúmulos centralmente concentrados al igual que los cúmulos ricos en espirales (Oemler 1974), como por ejemplo, el cúmulo de Hércules). En contraste, en el cúmulo de Coma, el coeficiente b muestra un comportamiento contrario: su valor es mayor en la región central (más densa). Lo mismo ocurre en Coma con el coeficiente d del término del brillo superficial.

Cuando se intentó excluir del ajuste en la ecuación III.4 a aquellas galaxias que se desviaban más de la relación promedio, fué evidente que dichas galaxias eran precisamente las de mayor y menor luminosidad en cada una de las muestras de los cúmulos. Esto sugiere sin duda que en la regresión construída para $\log r_e$ y M_v no hemos removido adecuadamente la dependencia en M_v . Por

TABLA III.1. Ajuste lineal de $\log r_e$ como función de M_v .

CUMULO	$\log r_e = a + b M_v$		
	(error a)	(error b)	
Coma Centro	$\log r_e = -4.670$ (± 0.685)	$- 0.234 M_v$ (± 0.033)	$r=0.552$ $\sigma=0.29$
Coma West y Far West	$\log r_e = -4.220$ (± 0.575)	$- 0.225 M_v$ (± 0.028)	$r=0.679$ $\sigma=0.28$
Perseo Centro	$\log r_e = -3.845$ (± 0.949)	$- 0.198 M_v$ (± 0.045)	$r=0.652$ $\sigma=0.26$
Perseo Fuera	$\log r_e = -4.267$ (± 0.649)	$- 0.225 M_v$ (± 0.031)	$r=0.626$ $\sigma=0.35$
Perseo LSB	$\log r_e = -2.987$ (± 0.883)	$- 0.180 M_v$ (± 0.044)	$r=0.584$ $\sigma=0.38$
Abell 2199 Centro	$\log r_e = -3.024$ (± 0.795)	$- 0.158 M_v$ (± 0.039)	$r=0.514$ $\sigma=0.22$
Abell 2199 Fuera	$\log r_e = -4.158$ (± 0.552)	$- 0.221 M_v$ (± 0.028)	$r=0.615$ $\sigma=0.32$
Abell 1367	$\log r_e = -4.724$ (± 0.440)	$- 0.254 M_v$ (± 0.022)	$r=0.746$ $\sigma=0.32$
Abell 1228	$\log r_e = -6.057$ (± 0.708)	$- 0.315 M_v$ (± 0.035)	$r=0.744$ $\sigma=0.29$
Hércules	$\log r_e = -5.423$ (± 0.255)	$- 0.283 M_v$ (± 0.012)	$r=0.899$ $\sigma=0.21$

TABLA III.2. Ajuste lineal de $\Delta \log r_e$ como función de μ_e .

CUMULO	$\Delta \log r_e = c$ (error c)	+ d μ_e (error d)	
Coma Centro	$\Delta \log r_e = -3.346$ (± 0.066)	+ 0.172 μ_e (± 0.003)	r=0.978 $\sigma=0.06$
Coma West y Far West	$\Delta \log r_e = -3.632$ (± 0.115)	+ 0.177 μ_e (± 0.006)	r=0.965 $\sigma=0.07$
Perseo Centro	$\Delta \log r_e = -3.395$ (± 0.071)	+ 0.172 μ_e (± 0.004)	r=0.99 $\sigma=0.03$
Perseo Fuera	$\Delta \log r_e = -3.368$ (± 0.085)	+ 0.164 μ_e (± 0.004)	r=0.974 $\sigma=0.08$
Perseo LSB	$\Delta \log r_e = -4.576$ (± 0.152)	+ 0.207 μ_e (± 0.007)	r=0.982 $\sigma=0.07$
Abell 2199 Centro	$\Delta \log r_e = -3.271$ (± 0.061)	+ 0.169 μ_e (± 0.003)	r=0.992 $\sigma=0.03$
Abell 2199 Fuera	$\Delta \log r_e = -3.086$ (± 0.062)	+ 0.155 μ_e (± 0.003)	r=0.980 $\sigma=0.06$
Abell 1367	$\Delta \log r_e = -3.156$ (± 0.107)	+ 0.154 μ_e (± 0.005)	r=0.945 $\sigma=0.11$
Abell 1228	$\Delta \log r_e = -2.520$ (± 0.169)	+ 0.126 μ_e (± 0.008)	r=0.880 $\sigma=0.14$
Hércules	$\Delta \log r_e = -1.874$ (± 0.149)	+ 0.095 μ_e (± 0.008)	r=0.748 $\sigma=0.14$

consiguiente se decidió efectuar una regresión simultánea de la forma:

$$\log r_e = A + EM_v + C\mu_e \quad \text{III.5}$$

En la Figura III.7 se presenta la relación entre el radio estimado $A + EM_v + C\mu_e$ graficado contra el radio observado $\log r_e$ para cada cúmulo. Las líneas corresponden a la idéntica, (radio estimado igual al radio verdadero). Los cúmulos tienen su origen desplazado para evitar confusión en los puntos graficados. Los símbolos corresponden a las regiones centrales de: Coma (Δ), Perseo (\oplus) y Abell 2199 (\odot) y los símbolos (Δ , \square , \circ) a las regiones externas de los mismos cúmulos. Los símbolos restantes representan a: Perseo LSB (\diamond), Abell 1367 (\times), Abell 1228 ($+$) y Hércules (\circ). Las galaxias marcadas con \times , corresponden a las galaxias RB 234 en Coma y Per 110 en Perseo LSB y fueron eliminadas del cálculo de la regresión por estar a más de 3σ de la relación promedio.

En la Tabla III.3 se resumen los respectivos valores de los coeficientes A, B, C y sus errores promedio. De las dispersiones mostradas en esta tabla es evidente que el ajuste simultáneo de la ecuación III.5 proporciona una estimación considerablemente mejor para los valores de A, B y C que aquella aplicando las sucesivas regresiones establecidas en las expresiones III.2 y III.4.

Investigaciones anteriores (e.g. Kormendy 1977, Strom y Strom 1978a, b, c, d, Davies et al. 1983, Binggeli et al. 1984,

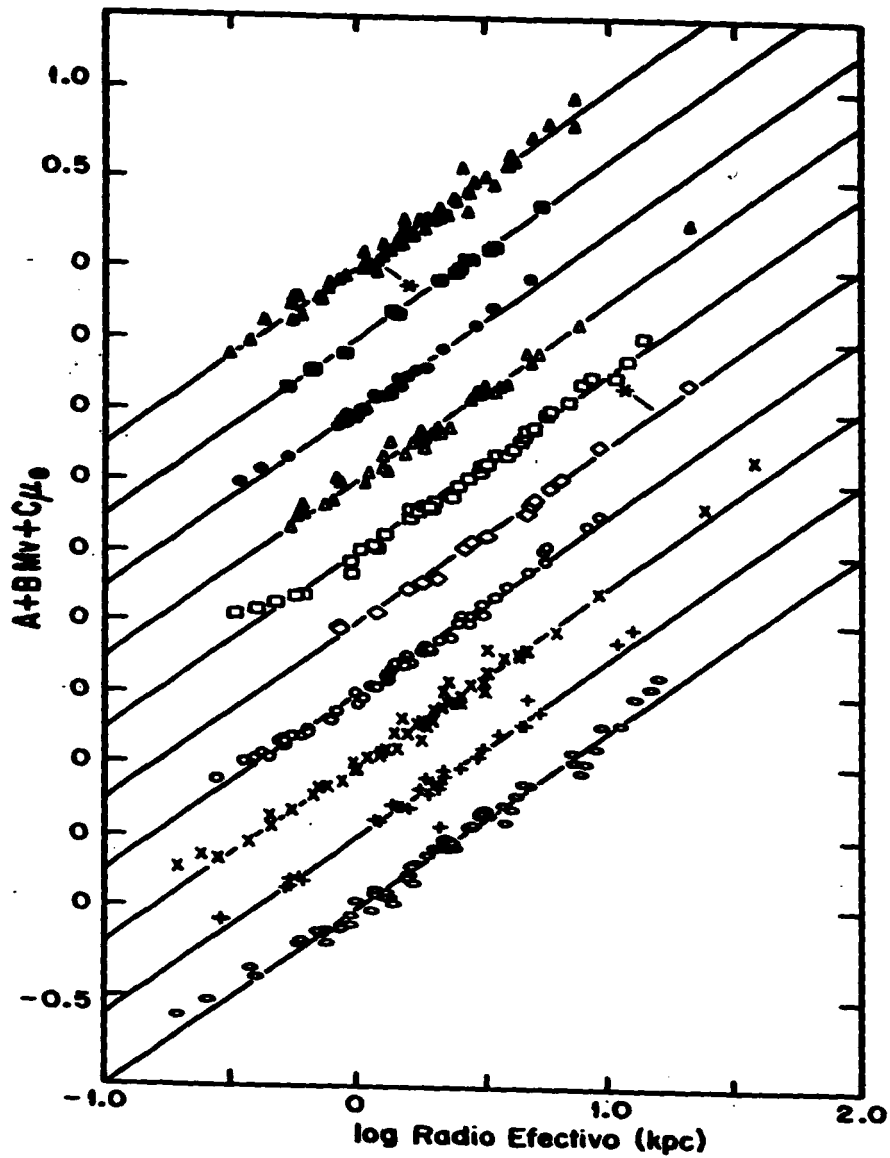


Figura III.7

TABLA III.3. Ajuste de $\log r_e$ como función de M_V y μ_e .

CUMULO	$\log r_e =$	A	+ B	M_V	+ C	μ_e	
		(error A)	(error B)		(error C)		
Coma Centro	$\log r_e =$	-7.346 (± 0.138)	-	0.201 M_V (± 0.006)	+	0.173 μ_e (± 0.003)	$\sigma=0.06$
Coma West y Far West	$\log r_e =$	-7.039 (± 0.123)	-	0.178 M_V (± 0.005)	+	0.184 μ_e (± 0.004)	$\sigma=0.05$
Perseo Centro	$\log r_e =$	-6.873 (± 0.083)	-	0.180 M_V (± 0.003)	+	0.173 μ_e (± 0.003)	$\sigma=0.02$
Perseo Fuera	$\log r_e =$	-6.627 (± 0.087)	-	0.171 M_V (± 0.004)	+	0.170 μ_e (± 0.002)	$\sigma=0.04$
Perseo LSB	$\log r_e =$	-7.716 (± 0.233)	-	0.187 M_V (± 0.008)	+	0.207 μ_e (± 0.007)	$\sigma=0.07$
Abell 2199 Centro	$\log r_e =$	-6.384 (± 0.120)	-	0.163 M_V (± 0.005)	+	0.169 μ_e (± 0.003)	$\sigma=0.03$
Abell 2199 Fuera	$\log r_e =$	-6.376 (± 0.066)	-	0.173 M_V (± 0.003)	+	0.159 μ_e (± 0.002)	$\sigma=0.04$
Abell 1367	$\log r_e =$	-6.864 (± 0.090)	-	0.190 M_V (± 0.004)	+	0.167 μ_e (± 0.003)	$\sigma=0.06$
Abell 1228	$\log r_e =$	-6.509 (± 0.166)	-	0.185 M_V (± 0.009)	+	0.154 μ_e (± 0.005)	$\sigma=0.07$
Hércules	$\log r_e =$	-6.316 (± 0.075)	-	0.176 M_V (± 0.004)	+	0.156 μ_e (± 0.004)	$\sigma=0.06$

Romanishin 1986). se han centrado en encontrar una relación entre el radio y la luminosidad, del tipo presentado en la expresión III.2. Sin embargo, este procedimiento no proporciona necesariamente una correlación correcta debido a las diferencias en la distribución del brillo superficial a una luminosidad dada.

Por otra parte, Lauer (1985) ha encontrado una relación para una muestra de 42 galaxias elípticas cercanas, como la que se presenta en ésta investigación entre el radio, la luminosidad y el brillo superficial de galaxias elípticas. Dicha relación la obtiene aplicando un análisis de componentes principales sobre la variables y que demuestra que estos parámetros están situados en un angosto plano en el espacio tridimensional definido por r_e , I_e y L . La comparación del análisis de los datos que se ha presentado arriba, ésto es, el ajuste simultáneo para r_e versus I_e y L , es entonces consistente con el análisis realizado por Lauer (1985).

III.3 VARIACION AMBIENTAL DEL RADIO EN GALAXIAS ELIPTICAS

En la Sección III.2 encontramos que los coeficientes B y C en la correlación doble III.5 no muestran un comportamiento consistente con respecto a factores ambientales. Por otro lado, las diferencias en B (o bien C) entre los diferentes cúmulos son de apenas algunas veces el error interno de B (o C) para cada cúmulo. Es entonces posible suponer que existe un valor universal para B y C, válido para todos los cúmulos. Suponiendo que sea éste el caso, estimaremos el mejor valor para tales

coeficientes, minimizando la suma de las dispersiones en cada cúmulo.

Si fijamos los valores de B y de C, podemos encontrar a la vez el valor del coeficiente A, para cada uno de los cúmulos que minimiza la ecuación:

$$\sigma^2 = E(\log r_e - A - \hat{B}M_v - \hat{C}\mu_e)^2 \quad \text{III.6}$$

También podemos calcular la dispersión promedio de la siguiente manera:

$$\tilde{\sigma}^2 = [\sum_{\text{cúmulos}} \sigma^2] / \text{número de cúmulos} \quad \text{III.7}$$

Para lograr encontrar \hat{B} y \hat{C} , fijamos el valor de C y calculamos B tal que $\tilde{\sigma}^2$ tenga un valor mínimo. Con éste valor para B encontramos ahora C tal que nuevamente σ^2 sea un mínimo. Repetimos el procedimiento hasta que el valor converja a un valor definitivo para B y C, que llamaremos \hat{B} y \hat{C} . Los coeficientes obtenidos en ésta forma son:

$$\begin{aligned} \hat{B} &= -0.178 (\pm 0.002) \\ \hat{C} &= 0.165 (\pm 0.002) \end{aligned} \quad \text{III.8}$$

y en la Tabla III.4 se presentan los coeficientes \tilde{A} para cada cúmulo bajo la suposición de los valores universales de la ecuación III.8.

En la Figura III.8 presentamos los radios estimados por $\tilde{A} + \hat{B}M_v + \hat{C}\mu_e$ versus el radio verdadero para las galaxias en los diferentes cúmulos. Los valores para el radio estimado son $A - 0.178 M_v + 0.165 \mu_e$. Los valores graficados de A están tomados de la Tabla III.4. Los símbolos son los mismos de la Figura III.7

TABLA III.4. Ajuste de $\log r_e$ versus $\tilde{A} + B M_V + C \mu_e$
 para $B = -0.178$ y $C = 0.165$.

CUMULO	\tilde{A} (error \tilde{A})	$\log r_e^{**}$ (Kpc)	$\log r_e^{***}$ (Kpc)
Coma Centro	-6.705 (± 0.040)	0.422	0.34
Coma West y Far West	-6.657 (± 0.039)	0.470	0.41
Perseo Centro	-6.678 (± 0.015)	0.449	0.41
Perseo Fuera	-6.658 (± 0.030)	0.469	0.46
Perseo LSB	-6.605 (± 0.007)	0.522	--
Abell 2199 Centro	-6.617 (± 0.020)	0.510	0.45
Abell 2199 Fuera	-6.585 (± 0.025)	0.542	0.53
Abell 1367	-6.602 (± 0.041)	0.525	0.56
Abell 1228	-6.573 (± 0.047)	0.554	0.52
Hércules	-6.540 (± 0.041)	0.587	0.55

^a $\log r_e^{**}$ es el valor para el radio efectivo evaluado de la ecuación (III.13) a $M_V = -21.5$ y $\mu_e = 20$.

^b $\log r_e^{***}$ es el valor para el radio efectivo tomado del $\log r_{26}$ por Strom y Strom (1978d), y estimado a $\mu_e = 20$ suponiendo una ley de de Vaucouleurs: $\log r_e^{***} = \log r_{26} - 0.94$.

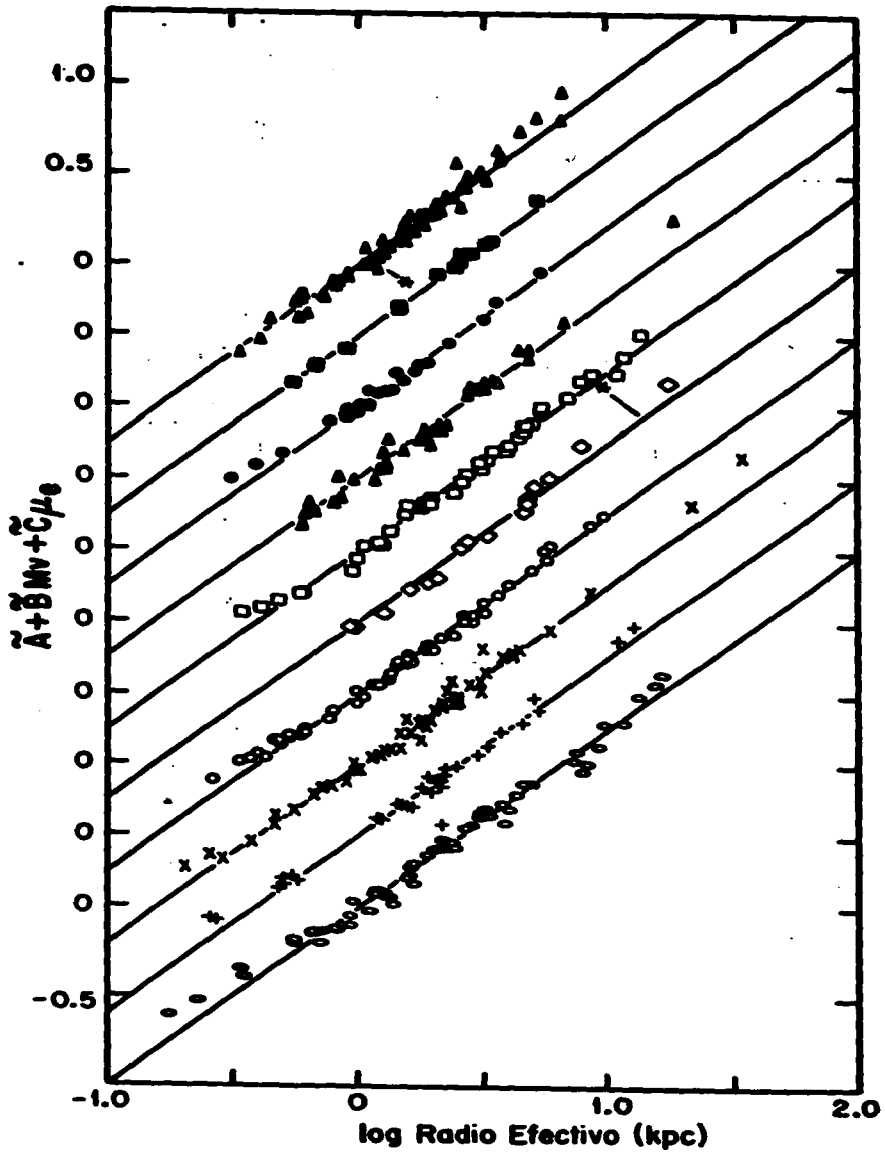


Figura III.8

La inspección y comparación de las Figuras III.7 y III.8 muestra que ambas no son muy diferentes entre sí, la diferencia principal es que la dispersión en la Figura III.3 es del orden de 0.05 mientras que aquélla de la Figura III.8 es 0.06.

Un análisis semejante se ha aplicado pero pesando la muestra de cada cúmulo por el número de galaxias que pertenecen a cada cúmulo. Nuevamente se obtienen los valores dados en la ecuación III.8.

La inspección de la Tabla III.4 muestra que existe una correlación entre los valores de \tilde{A} y el medio ambiente. Los valores para \tilde{A} en las regiones externas de Coma, Perseo y Abell 2199 son mayores que los valores correspondientes para las regiones centrales. Los cúmulos de baja densidad, ricos en galaxias espirales, muestran el mismo comportamiento y tienen valores también mayores de \tilde{A} , que significa que las galaxias tienen radios mayores, que los correspondientes para las galaxias situadas en regiones de cúmulos de alta densidad y centralmente condensados. Este resultado confirma de manera concluyente las tendencias reportadas por Strom y Strom (1978a, b, c) en su análisis de las relaciones r_e versus M_V para las galaxias elípticas en cúmulos.

En la Tabla III.4 también mostramos lo que se definió como: "radio típico", r_e (en Kpc) para las galaxias en cada uno de los cúmulos. Hemos calculado $\log r_e$ de la relación $\tilde{A} + \tilde{M}_V + \tilde{C}_u$ con los valores para B y C dados en la ecuación III.6

y de los valores para \tilde{A} dados en la Tabla III.4. Hemos usado una magnitud absoluta $M_v = -21.5$ "típica" (Strom y Strom 1978d) y también una $\mu_s = 20$ "típica" que corresponde al máximo de la distribución del brillo superficial en la muestra de Strom y Strom. Estos autores presentan valores para el radio métrico r_{26} para los cúmulos que hemos considerado (Strom y Strom 1978d); calculando dichos valores por medio de una relación entre el radio y el brillo superficial evaluada a $\mu_v = -21.5$. Para poder realizar una comparación razonable con r_s^* , hemos estimado los radios r_s^{**} para los cuales una galaxia "típica" tendría un brillo superficial $\mu_s = 20$. Suponiendo que se tiene un perfil de Vaucouleurs para μ_s de los valores de μ_s entre 20 y 26, obtenemos $\log r_s^{**} = \log r_{26} - 0.94$. Analizando y comparando los valores de r_s^* y r_s^{**} dados en la Tabla III.4, es claro que las diferencias en los radios típicos entre las regiones de alta densidad y de baja densidad en un cúmulo dado, son mayores en r_s^{**} que en r_s^* . Por lo que respecta a las Tablas III.1 y III.3, observamos el mismo comportamiento para los valores, en éste caso, de los coeficientes b y B del término en M_v en el sentido de que b muestra diferencias mayores que B cuando se le determina ya sea en las regiones de alta o de baja densidad, en un cúmulo dado. La razón de esta discrepancia recae en el método de ajuste utilizado, ya que como se ha demostrado arriba, la distribución de brillos superficiales afectará el ajuste de $\log r_s$ versus M_v de manera tal que la dependencia en M_v no se logra eliminar en forma apropiada a menos que se proceda a un ajuste simultáneo con M y μ_s .

III.4. GALAXIAS EN MEDIOS DENSOS.

La variación del radio de las galaxias con la densidad que se encontrara en la sección anterior, puede estar ocasionada por dos efectos: a) la relación entre el radio, el brillo superficial y la luminosidad puede estar variando con la densidad local, o bien, b) aún si se considera que es válida la misma relación, puede existir una diferencia en la distribución de brillos superficiales.

a) *Distribución de brillos superficiales.*

Usando los datos para los brillos superficiales de galaxias de Strom y Strom (1978a, b, c) para los cúmulos de alta y baja densidad, derivamos las distribuciones de brillo superficial, como la fracción de galaxias de un brillo superficial dado. La comparación entre los cúmulos demuestra que las distribuciones tienen máximos que varían en forma sistemática con la densidad local superficial de galaxias.

Se encuentra que típicamente, para los cúmulos de alta densidad, el máximo de dicha distribución ocurre a μ_s mayor, es decir, se encuentra un mayor número de galaxias de alto brillo superficial en las regiones más densas de los cúmulos, por ejemplo, en los centros de Coma y Perseo. Por el contrario, en los cúmulos de baja densidad o bien en las regiones poco densas de los cúmulos densos, como en la periferia de Coma (Coma W y F-W) y Perseo, el máximo de la distribución en el número de

galaxias, está a brillos superficiales más débiles.

Por otra parte, detectamos un efecto adicional: parecería que los cúmulos más densos tienen un menor contraste en el número de galaxias de alto y bajo brillo superficial, mientras que en los cúmulos de menor densidad superficial de galaxias, parece haber más galaxias de bajo brillo superficial comparativamente las de alto brillo superficial.

Davis y Djorgovsky (1985) han descrito un efecto similar en galaxias elípticas utilizando el catálogo de Nilsson, *Uppsala General Catalog of Galaxies* (1973) para magnitudes y diámetros y encontraron que las galaxias de mayor brillo superficial tendían a agruparse en mayor medida que las de bajo brillo superficial, si bien mencionan que este efecto posiblemente no sea real. Sin embargo, sus conclusiones confirman nuestros resultados, y se explica creemos, como un efecto de densidad ambiental.

Para los cúmulos de alta densidad como son Coma o Abell 2199, los máximos de distribución se encuentran a $\mu_s = 19$ magnitudes por segundo de arco cuadrado mientras que en el caso de un cúmulo de baja densidad como sería el cúmulo de Hércules, la distribución tiene su máximo a $\mu_s = 21$ magnitudes por segundo de arco cuadrado.

Una tendencia contraria se encuentra entre los valores más grandes de μ_s (entre 14 y 16 magnitudes por segundo de arco cuadrado). Encontramos que los cúmulos de baja densidad tienen

una fracción mayor de galaxias brillantes (en μ_0) que en los cúmulos de alta densidad. Este efecto es sin embargo marginal pues las galaxias de alto brillo superficial son pocas en número en la muestra comparada.

Por lo que respecta al extremo más débil de la distribución, éste presenta un brusco descenso después de su máximo. Esto es debido tal vez, a una falta de completez en la muestra en las galaxias de bajo brillo superficial. En particular, las galaxias más luminosas, las CD, no fueron estudiadas por los Strom (en el cúmulo de Coma y Abell 2199).

Las variaciones observadas en la distribución de brillos superficiales con la densidad podría explicar la variación de los radios con la densidad: el máximo de la distribución en las regiones de alta densidad está a mayor brillo superficial, y el efecto sería, de acuerdo a la ecuación III.1 en el sentido de que las galaxias tengan radios menores en medios ambientes más densos.

b) Variación real del radio efectivo con la densidad.

Dressler (1980) ha demostrado que el parámetro relevante que determina la morfología de las galaxias, es la densidad local superficial de galaxias (Capítulo II).

Para poder cuantificar de alguna manera el papel de la densidad local superficial de galaxias y su influencia en los parámetros estructurales de las galaxias elípticas de la manera

que lo hemos descrito, decidimos estimar los valores de la densidad de los datos existentes en la literatura para algunos cúmulos. Hemos usado la densidad proyectada como la define Dressler (1980a): ρ_{PROY} (número de galaxias por Mpc^2). Para calcular ρ_{PROY} es necesario aplicar una corrección de magnitud límite usando la función de luminosidad de Schechter (1976) a un límite de magnitud $M_v = -20.4$ ($H_0 = 50$). Los datos de conteos de galaxias existentes en la literatura, se agruparon en este estudio para los cúmulos que estudiamos. Se utilizó el catálogo de Dressler (1980a) para aquéllos casos en los que era posible estimar la densidad ρ_{PROY} directamente del número de galaxias en el área del cúmulo correspondiente. Este catálogo se usó también para obtener una estimación independiente de la densidad local galáctica usando la Figura 4 de Dressler (1980b) y con las fracciones de los tipos morfológicos en los cúmulos.

También se usaron conteos adicionales de galaxias para estimar la densidad de cúmulos determinada por diferentes autores: de Bahcall (1973) y de Geller y Beers (1982) para el cúmulo de Coma; de Bahcall (1974) y Kent y Sargent (1983) para el cúmulo de Perseo; Baier y Mai (1977) y Bahcall (1973, 1977) para el cúmulo Abell 2199. Para el cúmulo Abell 1367, usamos las estimaciones de Bahcall (1977) y Strom y Strom (1978b) y de Baier y Mai (1978) para Hércules. Se tuvo cuidado de corregir por las diferencias de área del cúmulo en cada estudio (corrigiendo por el área considerada en nuestro caso) y se estimó la ρ_{PROY} considerando solamente aquéllas galaxias situadas dentro del área en cada cúmulo o región del cúmulo, definida por los Strom,

(Strom y Strom 1978a, b, c).

En la Figura III.9 se presenta $\log r_e^*$ versus $\log \rho_{\text{prov}}$. Los valores de $\log r_e^*$ ($= \tilde{A} - 21.5\tilde{B} + 20\tilde{C}$) y sus errores se han tomado de la Tabla III.4; también se muestran en el eje de la derecha los valores para (\tilde{A}) . Los valores para ρ_{prov} se han estimado de la manera descrita arriba. Se tienen, para cada cúmulo, un número independiente de determinaciones de la densidad superficial basados en los datos de diversos autores que muestran diferencias ya sea en los conteos de galaxias o bien en el área considerada del cúmulo en cuestión. Se ha hecho una determinación más, basada en las fracciones relativas de los tipos morfológicos y se ha adoptado ρ_{prov} como el promedio de las determinaciones independientes. Las barras de error en la Figura III.9 corresponde al intervalo de valores independientes de ρ_{prov} obtenidos para cada cúmulo. Los símbolos, mismos de las Figuras III.7 y III.8, representan a los radios típicos para cada cúmulo de galaxias estudiado (con los radios definidos en las regiones centrales y externas para aquellos cúmulos donde se han separado las muestras).

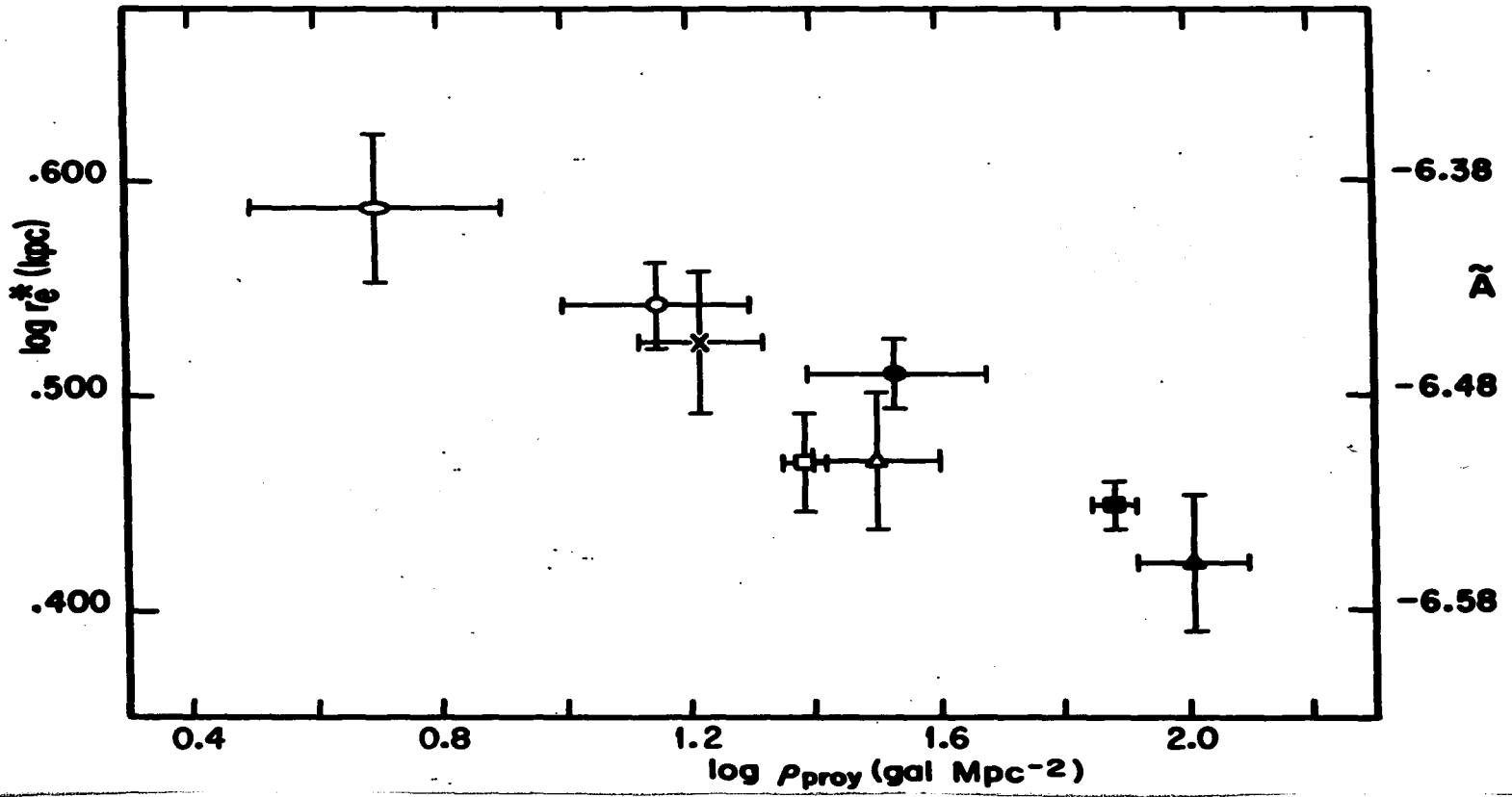
De la Figura III.9, es claro que el radio efectivo de las galaxias elípticas está correlacionado con la densidad superficial local de galaxias. Aplicando una regresión lineal del $\log r_e^*$ versus $\log \rho_{\text{prov}}$ se obtiene,

$$\log r_e^* = 0.671 (\pm 0.018) - 0.123 (\pm 0.011) \log \rho_{\text{prov}} \quad \text{III.9}$$

Alternadamente, si se efectúa un ajuste de A con $\log \rho_{\text{prov}}$

Figura III.9

III-31



se obtiene:

$$\tilde{A} = -6.426 (\pm 0.020) - 0.140 (\pm 0.016) \log \rho_{\text{proj}} \quad \text{III.10}$$

En las galaxias aquí estudiadas, la densidad $\log \rho_{\text{proj}}$ varía de ≈ 0.6 a 2 produciendo una variación en el radio de $\approx 60\%$. Si la relación III.9 es válida en el intervalo de tres décadas en ρ_{proj} estudiado por Dressler (1980b), el efecto de la densidad sobre el radio será de más de un factor de dos. Aguilar y White (1986) han estudiado los perfiles de densidad de galaxias que han sufrido interacciones de marea y encuentran que en prácticamente todos los casos, el radio isofotal de la galaxia disminuye. Como se espera que las interacciones de marea, ocurran en regiones de alta densidad de galaxias, una interacción de éste tipo, producirá un efecto semejante al descrito en la ecuación III.9. Este mismo argumento ha sido sugerido por otros autores (e.g. Faber 1973, Strom y Strom 1978a, b, c, d) sin haberlo cuantificado. Sin embargo, Aguilar y White han encontrado que para producir un cambio en el radio de las galaxias de 5% entre las galaxias situadas en las regiones externas e internas de un cúmulo típico, es necesario que transcurra un tiempo equivalente a $\approx 5 t_{\text{Hubble}}$. Este cambio resulta ser mucho menor que el cambio observado y en consecuencia es necesario otro mecanismo, para explicar la expresión III.9.

III.5 DISCUSION.

Es posible demostrar que para cualquier perfil de brillo superficial, la ecuación III.1 es válida siempre y cuando todas

las galaxias elípticas tengan un perfil de ése tipo. Si este es el caso, uno esperaría tener una relación de la forma

$$\log r_e = -0.2 M_v + 0.2 \mu_e \quad \text{III.11}$$

En ésta relación se supone que M_v y μ_e son representativos de la luz total de la galaxia. Esto debe ser cierto para μ_e y por lo tanto para M_v , ya que ha sido derivada a partir de la luz integrada.

De los valores de B y C en la Tabla III.3 y de sus errores respectivos, es claro que la expresión III.11 no es válida. Esto significa que para las galaxias elípticas, no existe un perfil universal de brillo superficial. Esta conclusión se basa únicamente en el hecho de que los coeficientes B y C de la luminosidad y el brillo superficial no son iguales a 0.2

Otra manera de expresar las ecuaciones III.5 y III.8 es la siguiente:

$$r_e = L^\alpha I_e^\beta \quad \text{III.12}$$

con los valores

$$\alpha = 0.445 (\pm 0.005)$$

$$\beta = -0.413 (\pm 0.005) \quad \text{III.13}$$

En éste caso, el perfil universal corresponde a $\alpha = 0.5$ y $\beta = -0.5$ y está a más de 11 errores standard de los valores en la expresión III.13.

Lauer (1985) ha obtenido también una relación como la expresión III.12 con $\alpha = 0.465$ y $\beta = -0.633$. Al combinar relaciones entre la luminosidad, dispersión de velocidades y

brillo superficial y entre el radio, velocidad de dispersión y brillo superficial obtenidas por Djorgovsky y Davis (1987), obtenemos también una relación de la forma de la ecuación III.12 con $\alpha = 0.446$ y $\beta = -0.513$. Las relaciones originales encontradas por Djorgovsky y Davis (1987) de su espectrofotometría CCD realizada en una muestra grande de galaxias elípticas en Virgo, Coma y otros cúmulos, contienen relaciones con la dispersión de velocidades, parámetro que han deducido de sus imágenes.

De la discusión anterior, parece ser que un valor universal de $\alpha = 0.45$ es consistente con todos éstos resultados. Por otro lado, el valor de β difiere significativamente de la expresión III.13. Sin embargo, por lo que respecta al valor de α y β , un resultado conflictivo y que se acerca más a los valores esperados (teóricos) de la ecuación III.12 de $\alpha = 0.5$ y $\beta = -0.5$, son los resultados obtenidos por Dressler et al. (1987): los valores de éstos autores son: $\alpha = 0.50$ y $\beta = -0.50$. En todo caso, se puede señalar sin duda, que los resultados de Lauer, Djorgovsky y Davis y aún los de Dressler et al., fortalecen la conclusión de éste trabajo, de que no existe un perfil universal ($\alpha = 0.5$) para las galaxias elípticas.

Como se establece en la discusión anterior, L no es proporcional a r_e y se infiere que existe una cierta información de distancia en el brillo superficial μ_e . Podemos entonces usar la expresión III.5 y los valores para los coeficientes III.7 para obtener la distancia a una galaxia en términos de

la magnitud aparente m_v , del radio efectivo angular θ_e y el brillo superficial a éste radio, μ_e :

$$\log D = 61.5 - 9.09 (\log \theta_e - \bar{X} + 0.178 m_v - 0.165 \mu_e) \quad \text{III.14}$$

Es posible también usar la relación III.10 entre la \bar{X} y la ρ_{prev} para obtener

$$\begin{aligned} \log D = \\ 0.874 + 5.882 (\log \theta_e + 0.178 m_v - 0.165 \mu_e + 0.14 \rho_{\text{prev}}) \end{aligned} \quad \text{III.15}$$

En ésta expresión, las unidades de la distancia, D son Mpc, para el radio efectivo angular θ_e , son segundos de arco y para ρ_{prev} resultan ser galaxias por grado cuadrado.

CAPITULO III

REFERENCIAS

- Aguilar, L.A., y White, S.D.M. 1985, *Astrophys. J.*, 295, 374.
- Bahcall, N.A. 1973, *Astrophys. J.*, 180, 699.
- Bahcall, N.A. 1974, *Astrophys. J.*, 187, 439.
- Bahcall, N.A. 1977, *Astrophys. J.*, 218, L93.
- Baier, F.W. y Mai, W. 1977, *Astron. Nach.*, 298, 301.
- Baier, F.W. y Mai, W. 1978, *Astron. Nach.*, 299, 125.
- Binggeli, B., Sandage, A., y Tarenghi, M. 1984, *Astron. J.*, 89, 64.
- de Vaucouleurs, G. 1946, *Ann. d'Ap.*, 11, 247.
- de Vaucouleurs, G. 1953, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 113, 134.
- Davies, R.L., Efstathiou, G., Fall, S.M., Illingworth, G., y Schechter, P.L. 1983, *Astrophys. J.*, 266, 41.
- Davis, M. and Djorgovski, S. 1985, *Astrophys. J.*, 299, 15.
- Dressler, A. 1980a, *Astrophys. J. Suppl.*, 42, 565.
- Dressler, A. 1980b, *Astrophys. J.*, 236, 351.
- Faber, S.M. 1973, *Astrophys. J.*, 179, 423.
- Geller, M.J. y Beers, T.C. 1982, *Pub. Astron. Soc. Pacific*, 94, 421.
- Hubble, E. 1930, *Astrophys. J.*, 71, 231.
- Kormendy, J. 1977, *Astrophys. J.*, 218, 333.
- Lauer, T.R., 1985, *Astrophys. J.*, 292, 104.
- Oemler, A., Jr. 1976, *Astrophys. J.*, 209, 693.
- Recillas-Cruz, E. y Serrano, A. 1987, en *Structure and Dynamics of Elliptical Galaxies*, UAI, Simposio N° 127, (ed.) T. de Zeeuw, p. 369.
- Romanishin, W. 1986, *Astron. J.*, 91, 76.

Schechter, P. 1976, *Astrophys. J.*, 203, 297.

Strom, K.M., y Strom, S.E. 1978a, *Astron. J.*, 83, 73.

Strom, S.E., y Strom, K.M. 1978b, *Astron. J.*, 83, 732.

Strom, K.M., y Strom, S.E. 1978c, *Astron. J.*, 83, 1293.

Strom, S.E., y Strom, K.M. 1978d, *Astrophys. J.*, 225, L93.

Strom, S.E., y Strom, K.M. 1979, *Astron. J.*, 84, 1091.

CAPITULO IV

PROPIEDADES DINAMICAS Y CARACTERISTICAS FOTOMETRICAS DE GALAXIAS ELIPTICAS EN EL CUMULO DE COMA.

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos con la fotometría de galaxias elípticas (y SO) realizada en el cercano infrarrojo J, H y K del cúmulo de galaxias de Coma. Hemos estudiado este cúmulo en particular por las condiciones de alta densidad ambiental de galaxias existentes en Coma y se ha analizado de manera independiente al cúmulo de Virgo en el presente capítulo, para destacar precisamente aquellas de sus propiedades intrínsecas que se encuentra, son afectadas por la densidad ambiental.

Consecuentemente, presentamos aquí, los datos y las propiedades generales deducidas de las magnitudes, los colores, las relaciones color-luminosidad, luminosidad-metalicidad, luminosidad-dispersión de velocidades, luminosidad-dispersión de velocidades y brillo superficial, resultado de nuestras observaciones del cúmulo de Coma. La obtención y reducción de los datos en el cercano IR que forman el conjunto de luminosidades analizadas en el capítulo respectivo para el cúmulo de Virgo, seguirá los mismos preceptos que aquí describimos para Coma, así como buena parte de las discusiones más importantes.

Se reporta también un análisis de la elipticidad de las

galaxias y su relación con el color en el cercano infrarrojo y la dependencia con la densidad ambiental de galaxias. Se revisa igualmente, la relación entre la metalicidad y los cambios de color en el cercano infrarrojo.

Finalmente, se discuten los resultados obtenidos comparándolos con estudios previos y se proponen nuevos argumentos en favor de una fracción mayor de estrellas de masa pequeña en los sistemas de bajo brillo superficial, estas estrellas contribuyen a incrementar la masa de las galaxias mas no tanto su luminosidad, causando un incremento en su cociente M/L . Encontramos también otro resultado fundamental: el cociente M/L estimado de observaciones en el cercano infrarrojo para galaxias elípticas resulta prácticamente constante con la luminosidad, lo cual implica que con la posible excepción de las galaxias CD, las galaxias elípticas no son el producto de la fusión de galaxias, "mergers", de masas menores.

IV.1 INTRODUCCION.

Para explorar la posibilidad de que las galaxias tengan propiedades comunes en el cercano IR y de que éstas varíen con la densidad ambiental, hipótesis ya discutida en el Capítulo III para el óptico (Recillas-Cruz y Serrano, 1986), he iniciado un extenso programa de observaciones en el cercano infrarrojo en las bandas fotométricas J ($1.2\mu\text{m}$), H ($1.65\mu\text{m}$) y K ($2.2\mu\text{m}$), de galaxias de diferente tipo morfológico en cúmulos de galaxias. En una primera fase de éste estudio, se observaron 103 galaxias de diverso tipo morfológico del cúmulo de galaxias de Coma en las

bandas fotométricas ya mencionadas en un intento de obtener una muestra suficientemente amplia, homogénea y muy precisa de la fotometría infrarroja de galaxias. La muestra de las galaxias elípticas es la que discutiremos principalmente en éste capítulo, si bien los resultados reportados por Recillas-Cruz, Carrasco, Serrano y Cruz-González (1987), incluyen también observaciones de algunas galaxias espirales del cúmulo de Coma.

Estudios anteriores (Sandage 1972, Visvanathan y Sandage 1977, Frogel et al. 1978, Aaronson et al. 1981 y Frogel y Whitford 1987) mostraron que las galaxias elípticas tienen colores muy similares a los colores de estrellas gigantes de tipo tardío, G y K. Esto debido a que la luz de las galaxias elípticas está dominada por la estrellas de la rama gigante. La misma clasificación de tipos morfológicos de Morgan (1970), el llamado sistema de Yerkes, asigna a las diferentes clases de galaxias un tipo espectral integrado (conjuntamente con el grado de concentración de la galaxia) que en el caso de las galaxias elípticas no es más tardío que K. Más aún, la presencia de gas rico en polvo concentrado en las regiones nucleares -consecuencia de los procesos de pérdida de masa estelar- en galaxias de tipo temprano se observa como enrojecimiento interno y afecta la determinación de las luminosidades totales inferidas de observaciones en el visible y el azul. Estos efectos resultan despreciables a longitudes de onda superiores a $1\mu\text{m}$.

Por éstas razones, el estudio de las galaxias de tipo temprano en el cercano infrarrojo resulta de fundamental

importancia, ya que es posible medir con precisión objetos de luminosidades menores dado que la luz de éstas galaxias está dominada por la luz de estrellas frías, cuya distribución de energía presenta máximos en las bandas fotométricas de esta región espectral. En particular, una galaxia elíptica (o el "bulge" de una galaxia espiral) tiene el máximo de su distribución espectral de luz, en algún punto comprendido entre las bandas I (0.9 μm) y H (1.65 μm).

Cabe señalar que si bien el trabajo que se describe a continuación se refiere principalmente a las galaxias elípticas, incluiremos en la discusión -como una extensión natural- a las galaxias SO o lenticulares listadas también en las tablas que resumen las observaciones. Se han determinado también sus colores y las relaciones color-color, luminosidad-color al igual que las relaciones dinámicas, ya discutidas en el capítulo II y que tienen propiedades y características semejantes a las encontradas en las elípticas.

En las diversas secciones de este capítulo, se describen la técnica observacional, las relaciones color-color, color-luminosidad y luminosidad-dispersión de velocidades y la relación luminosidad-dispersión de velocidades-brillo superficial deducida para la muestra de galaxias elípticas (Recillas-Cruz et al. 1987) en el cercano infrarrojo. Se discute la posible dependencia de la relación luminosidad-dispersión de velocidades (y brillo superficial) con la longitud de onda en la que se obtiene la luminosidad y la relación masa/luminosidad y se

comparan y discuten las conclusiones de este estudio en el cercano infrarrojo con lo obtenido por otros autores con la fotometría tradicional en las bandas B y V.

IV.2 OBTENCION Y ANALISIS DE LOS DATOS.

a) Las observaciones.

Se midieron en las bandas fotométricas J, H y K del cercano infrarrojo, 103 miembros del cúmulo de galaxias de Coma, todas ellas más brillantes que la magnitud visual $m_v = 16$ (Dressler 1980). Los datos se obtuvieron durante cuatro temporadas de observación (Marzo-Abril 1986, Julio-Agosto 1986, Febrero-Marzo y Abril-Mayo de 1987) con un fotómetro que utiliza un diodo fotovoltaico de Antimonio de Indio (InSb) enfriado a temperatura de nitrógeno sólido (68 °K) instalado en el telescopio de 2.12 m del Observatorio Astronómico Nacional (OAN) de San Pedro Mártir, B.C. Los detalles técnicos y características de este fotómetro han sido reportadas por Roth et al. (1984). El telescopio está equipado con un espejo secundario $f/27$ oscilante que permite ajustar tiros largos (algunos minutos de arco) con una cancelación adecuada del cielo. En particular este programa de observación de galaxias, siendo éstas objetos extendidos y de bajo brillo superficial, requieren de técnicas no probadas anteriormente con el equipo IR del OAN con el telescopio de 2.12 m para los tiros largos y la configuración del sistema, ya que es necesario asegurarse que en las mediciones alternas ("chopeo") galaxia-cielo, este último no incluya radiación de las partes

externas de la galaxia que se mide. En el caso de algunos de los miembros más luminosos del cúmulo de Coma como son las dos galaxias tipo cD que se localizan cerca del centro del cúmulo, se procuró ajustar el tiro al valor máximo permitido, para que las mediciones fuesen lo más correcto posible.

La configuración elegida y por otro lado, la excelente óptica de campo de Fabry, nos provee con una respuesta esencialmente plana, sobre un campo superior a 14 segundos de arco. Estas características nos permitieron obtener fotometría infrarroja precisa de objetos extendidos como los que se estudiaron en el presente trabajo. Las observaciones reportadas aquí, se obtuvieron a través de un diafragma de 14 segundos de arco, el más grande de nuestro sistema, mas no suficientemente grande como para incluir la totalidad de la galaxia observada, esto es, algunas de las galaxias estudiadas eran más extendidas que nuestra apertura. Las magnitudes y colores obtenidos con dicha apertura corresponden a la región del "bulge" (núcleo) y han sido corregidos a las dimensiones de la galaxia en aquéllos casos donde se conocen los diámetros, como se describe en la sección IV.5. La frecuencia de chopeo fué de 12 Hz y el tiro mínimo adoptado fué de 80 segundos de arco y el máximo de hasta 140 segundos de arco. El experimento fué controlado al telescopio con una microcomputadora y los datos registrados en medios magnéticos, finalmente los datos fueron reducidos al sistema standard de fotometría JHK (Johnson 1966) Los tiempos de integración adoptados fueron variables dependiendo de los filtros y de la magnitud de los objetos y se ajustaron para obtener un

error formal máximo de 3% en las medidas individuales, meta que no siempre fué posible alcanzar. Los valores para cada galaxia se listan, conjuntamente con los valores de las magnitudes y los colores corregidos en la Tabla IV.1.

b) Correcciones K y de enrojecimiento.

Para corregir por absorción del material interestelar galáctico, se aplicaron las correcciones del modelo de absorción-libre en el polo galáctico (Sandage (1973) puesto que la región en donde se encuentra el cúmulo de Coma está prácticamente libre de absorción. Por tanto, la A_V es del orden de 10^{-4} magnitudes y las correcciones que se aplican para las magnitudes y los colores, son despreciables.

Por otro lado, de los mapas de enrojecimiento de Burstein y Heiles (1982), hemos estimado que $E(B-V)$ es < 0.02 en la región del cúmulo de Coma; usando la curva de enrojecimiento N°15 de van der Hulst (Johnson 1966), $A_V = 3E(B-V)$, A_V debe ser menor que 0.06 para el cúmulo. Si se adopta $A_V = 0.06$ y los valores 0.1 0.06 y 0.08 para $E(J-H)/A_V$, $E(H-K)/A_V$ y A_K/A_V respectivamente, obtenemos correcciones para las magnitudes y los colores menores de 0.01 mag. Consecuentemente, no es necesario aplicar correcciones por enrojecimiento para el estudio fotométrico de este cúmulo.

Las llamadas correcciones-K, efecto que es causado por la velocidad de recesión del objeto y que dependen de su distancia, han sido estimadas para el infrarrojo por Persson et al. (1979)

como una función lineal en z , el corrimiento al rojo. Esto es, las correcciones para $(J-H)$, $(H-K)$ y K son, respectivamente, $-0.5z$, $-3.5z$ y $-3.3z$ magnitudes. Si se toma $z = 0.023$ (Dressler 1980), dichas correcciones, resultan ser de 0.012, 0.061 y 0.076 respectivamente; lo suficientemente pequeñas para suponer que la dispersión de velocidades interna al cúmulo es despreciable, por lo que hemos corregido nuestra fotometría suponiendo una velocidad de recesión promedio para todos los miembros del cúmulo de Coma.

Los valores observados para las magnitudes J , H y K y los colores corregidos por los efectos arriba descritos, se presentan en la Tabla IV.1. En las Columnas 1 y 2 se listan los números de las galaxias según Dressler (1980) y el tipo morfológico, las columnas 3, 4 y 5 contienen los valores observados de las magnitudes J , H y K junto con sus errores formales. En las columnas 6, 7 y 8 se han listado los colores $(J-H)$, $(H-K)$ y $(J-K)$ corregidos por corrimiento al rojo y en la columna 9 se listan las denominaciones por número de NGC, IC u otras designaciones para las galaxias observadas. Finalmente, en la columna 10 se dan los valores individuales del tiro usado para cada galaxia observada. Buscando que las mediciones fuesen confiables, se procuró medir más de una ocasión una buena fracción de las galaxias, y se adoptaron las medidas promedio.

IV.3 RELACIONES COLOR-COLOR EN EL CERCANO INFRARROJO

a) *Diagrama $(J-H)$ versus $(H-K)$.*

TABLA IV.1. Fotometría JHK de Galaxias Elípticas y SO en Coma.

Dress.											NGC.	Tiro
N	T.M.	J	H	K	(J-H)	(H-K)	(J-K)	IC			(segarc)	
5	Sap	14.60	.15	14.12	.08	13.59	.09	0.47	0.45	0.92		112
7	E	-----	-----	14.98	.03	-----	-----	-----	-----	-----		112
8	SBa	13.63	.04	13.14	.06	12.84	.07	0.48	0.23	0.71		82
11	SA	13.21	.04	12.73	.06	12.23	.13	0.47	0.43	0.90		82
12	Sp	14.00	.07	13.35	.06	12.86	.07	0.64	0.42	1.06		82
24	E	12.43	.03	11.73	.06	11.38	.04	0.69	0.28	0.97		140
26	SOp	13.59	.09	12.89	.04	12.67	.05	0.69	0.15	0.84		131
30	SO	12.41	.03	11.56	.06	11.32	.05	0.84	0.17	1.01	N4842A	140
31	E/SO	11.72	.02	10.94	.06	10.71	.04	0.77	0.16	0.93	N4839	140
38	Sbc	13.97	.05	13.18	.03	12.74	.07	0.78	0.37	1.15		112
39	SO/E	13.17	.05	12.60	.05	12.30	.04	0.56	0.23	0.79		139
42	SO	13.34	.07	12.56	.05	12.29	.04	0.76	0.20	0.96		139
43	SOp	11.98	.03	11.26	.02	10.88	.02	0.71	0.20	0.91	N4853	139
46	E/SO	12.10	.02	11.35	.02	11.09	.02	0.74	0.19	0.93		131
47	SA	13.26	.06	12.72	.04	12.34	.04	0.53	0.31	0.84	N4926A	112
49	E	11.68	.03	10.99	.02	10.68	.03	0.68	0.24	0.92	N4926	139
51	Sb	14.80	.09	13.90	.05	13.89	.25	0.89	-0.06	0.83		91
54	Sb	13.83	.05	13.05	.04	12.70	.07	0.77	0.28	1.05		97
57	SO/a	12.55	.01	11.88	.04	11.54	.02	0.66	0.27	0.93		131
58	SO	12.84	.02	12.16	.03	11.93	.03	0.67	0.16	0.83	N4854	
61	SO	13.57	.05	12.81	.06	12.60	.05	0.75	0.14	0.89		139
69	E	12.53	.05	11.85	.04	11.51	.02	0.67	0.27	0.94	I3959	139
70	E	13.33	.02	12.47	.02	12.20	.03	0.85	0.20	1.05	I3947	90
72	E	13.06	.01	12.25	.03	12.10	.03	0.80	0.08	0.81	I3947	131
78	E	12.30	.04	11.67	.03	11.28	.03	0.62	0.32	0.94	N4923	139
79	SO	12.45	.04	11.66	.02	11.36	.03	0.78	0.23	1.01	N4919	126
82	Sb	12.35	.04	11.68	.01	11.27	.01	0.66	0.34	1.00	N4911	112
89	S	12.92	.03	12.25	.03	11.76	.04	0.66	0.42	1.08	I3949	131
91	SO	12.57	.04	11.71	.03	11.47	.02	0.85	0.17	1.02	I3946	131
92	SO	13.12	.04	12.38	.07	12.15	.05	0.73	0.16	0.89		140
93	SO	13.49	.06	12.65	.09	12.43	.09	0.83	0.15	0.98		97
97	Sb	12.14	.04	11.48	.01	11.28	.03	0.65	0.13	0.78	N4921	112
98	SO/a	13.06	.04	12.32	.03	12.03	.03	0.73	0.22	0.95		126
100	I	14.11	.08	13.51	.08	12.98	.07	0.59	0.46	1.05		97
101	SO	13.40	.05	12.78	.05	12.42	.06	0.61	0.29	0.90		97
103	SO/a	12.59	.03	11.75	.02	11.50	.03	0.83	0.18	1.01	I3973	131
104	SO	12.96	.04	12.21	.03	11.88	.04	0.74	0.26	1.00	N4875	131
105	E	12.39	.03	11.54	.03	11.23	.03	0.84	0.24	1.08	N4869	139
109	SO	12.87	.05	12.15	.04	11.81	.04	0.71	0.27	0.98	I3960	131
116	SBO	12.52	.04	11.81	.05	11.46	.06	0.70	0.28	0.98		82

TABLE III.1 (cont.)

118	E	12.59	.04	11.96	.03	11.75	.03	0.62	0.14	0.76	N4906	139
121	E	12.24	.05	11.46	.02	11.14	.02	0.77	0.25	1.02	N4898W	121
124	E	12.85	.05	12.11	.03	11.74	.03	0.73	0.25	0.98	N4876	139
129	D	11.72	.03	11.06	.04	10.78	.03	0.67	0.19	0.86	N4874	91
130	E/so	12.73	.03	11.91	.01	11.59	.03	0.81	0.25	1.06	N4872	131
131	so	12.74	.03	11.94	.02	11.66	.03	0.79	0.21	1.00	N4871	131
133	E	12.70	.04	11.88	.02	11.63	.02	0.81	0.18	0.99	N4867	139
137	E/so	12.67	.05	11.94	.03	11.57	.03	0.72	0.30	1.02	N4850	139
139	so	13.42	.03	12.64	.06	12.26	.05	0.77	0.31	1.08		127
140	E	13.00	.03	12.32	.04	12.08	.04	0.67	0.17	0.84		127
141	Ep	12.09	.03	11.28	.02	10.96	.02	0.80	0.25	1.05	N4927	139
143	E	12.36	.05	11.62	.02	11.35	.03	0.73	0.20	0.93	I4051	138
144	so/a	12.54	.03	11.84	.01	11.52	.04	0.69	0.25	0.94	I4042	131
145	so	13.17	.04	12.54	.05	12.20	.03	0.62	0.27	0.89	I4041	139
147	so	13.81	.05	13.10	.07	12.92	.07	0.70	0.11	0.81		97
148	D	11.14	.01	10.41	.02	10.10	.01	0.72	0.24	0.96	N4889	90
149	so	12.76	.03	12.22	.04	11.95	.05	0.53	0.20	0.73		127
150	E	13.67	.04	12.83	.05	12.55	.06	0.83	0.21	1.04	I4011	127
151	E	12.71	.03	12.01	.03	11.89	.04	0.69	0.05	0.74	N4886	91
152	SBO	13.06	.05	12.39	.03	12.14	.05	0.66	0.18	0.84	I3998	126
153	E	13.62	.03	12.91	.05	12.52	.06	0.70	0.32	1.02		90
155	so	12.95	.05	12.20	.08	11.78	.03	0.74	0.35	1.09	N4873	155
159	E	12.09	.03	11.32	.07	11.14	.04	0.76	0.11	0.87	N4864	137
160	SBO	12.98	.03	12.16	.04	11.85	.08	0.81	0.24	1.05	I3955	131
161	E	12.48	.04	11.89	.07	11.67	.05	0.58	0.15	0.73		137
163	so	12.60	.04	11.86	.03	11.60	.02	0.73	0.19	0.92	N4828	127
164	so	11.76	.01	11.11	.03	10.89	.03	0.64	0.15	0.79	N4931	135
166	so/E	12.63	.02	11.96	.03	11.75	.02	0.66	0.14	0.80	N4929	131
167	so/E	12.18	.02	11.55	.01	11.23	.02	0.62	0.25	0.87	N4908	131
168	E	12.25	.05	11.64	.02	11.29	.03	0.60	0.28	0.88	I4045	137
169	Scd	13.21	.04	12.54	.04	12.12	.03	0.66	0.35	1.01	I4040	91
170	SBO	13.27	.05	12.71	.02	12.29	.04	0.55	0.35	0.90	I4026	131
172	E	12.99	.03	12.25	.02	11.96	.04	0.73	0.22	0.95	I4021	131
174	E	12.84	.04	12.18	.02	11.84	.03	0.65	0.27	0.92	I4012	131
175	so	12.59	.02	11.91	.02	11.62	.03	0.67	0.22	0.89	N4883	131
176	so	13.17	.03	12.62	.06	12.27	.04	0.54	0.28	0.82		97
179	so	11.91	.03	11.20	.06	11.00	.05	0.70	0.13	0.83	N4865	137
190	so	12.63	.02	11.83	.03	11.53	.03	0.79	0.23	1.02		137
192	so	13.57	.09	12.79	.02	12.51	.06	0.77	0.21	0.98		131
193	E	13.54	.06	12.94	.02	12.52	.03	0.59	0.35	0.94	RB155	90
194	E	11.98	.03	11.24	.06	10.92	.04	0.73	0.25	0.98	N4860	140
195	Sbc	13.98	.07	13.35	.04	12.99	.01	0.62	0.30	0.88	N4858	111
197	so/a	12.85	.02	12.26	.03	11.90	.04	0.58	0.29	0.87		135
199	so	13.24	.04	12.56	.03	12.18	.03	0.67	0.31	0.98	N4851	126
205	SBB	12.56	.03	11.87	.03	11.69	.04	0.68	0.11	0.79	N4907	130
206	so	11.94	.02	11.14	.01	10.96	.04	0.79	0.11	0.90	N4895	137
207	E	13.11	.04	12.44	.04	12.19	.07	0.66	0.18	0.84	RB167	137
209	so	---	---	13.11	.07	---	---	---	---	---		130
210	Ep	12.95	.06	12.45	.04	12.14	.06	0.49	0.24	0.73		133
211	Sa	12.98	.05	12.30	.03	12.05	.04	0.67	0.18	0.85		130

TABLA III.1 (cont.)

212	SO	13.31	.03	12.56	.03	12.43	.04	0.74	0.06	0.80		133
213	SO	12.78	.03	12.12	.05	11.78	.04	0.66	0.26	0.92		130
217	E	12.37	.04	11.54	.01	11.40	.04	0.82	0.07	0.89	N4881	137
218	SO ^a	12.60	.03	11.93	.03	11.47	.03	0.66	0.39	1.05		135
220	Scd	12.54	.03	11.84	.02	11.50	.02	0.69	0.27	0.96	N4848	91
226	SO	13.13	.04	12.58	.02	12.12	.05	0.54	0.39	0.93		126
228	SBO	12.88	.05	12.23	.03	11.87	.03	0.64	0.29	0.93		112
230	SO	12.35	.07	11.60	.03	11.30	.02	0.74	0.23	0.97		133
232	SO	12.47	.05	11.79	.03	11.48	.04	0.67	0.24	0.91	N4896	130
238	E	13.51	.04	12.76	.05	12.63	.05	0.74	0.06	0.80		111
239	E	12.16	.03	11.51	.03	11.25	.03	0.64	0.19	0.83	N4841B	135
240	E	11.79	.02	11.09	.02	10.79	.02	0.70	0.23	0.92	N4841A	89
247	Sc	13.32	.05	12.99	.03	12.49	.06	0.32	0.43	0.75		91

Como se vio en el Capitulo II, la relación color-color para galaxias elípticas estudiada en el óptico nos permite apreciar la calidad de la luz emitida por una galaxia. Se han estudiado los colores de las galaxias utilizando filtros de banda ancha estableciendo la diferencia de brillo en un par de filtros dado.

En el cercano infrarrojo, se ha encontrado que las bandas J, H y K son ideales para obtener flujos bolométricos y colores para la población de estrellas frías que constituyen las regiones centrales de alto brillo superficial de las galaxias tempranas. (Faber 1973, Frogel et al. 1976, Aaronson et al. 1981).

En el presente trabajo se construyeron diversos diagramas que se presentan en las Figuras IV.1a y IV.1b, utilizando los datos obtenidos de las magnitudes corregidas para 36 galaxias elípticas, cD y E/S0 y 47 galaxias S0 y S0/a. El diagrama de las galaxias elípticas (Fig. IV.1a) muestra una marcada concentración alrededor de los valores promedio de color, $\langle(J-H)\rangle = 0.71 \pm 0.06$ y $\langle(H-K)\rangle = 0.21 \pm 0.07$. El correspondiente diagrama para las galaxias S0 y S0/a (Fig. IV.1b) muestra que los colores promedio son muy parecidos a los de las galaxias elípticas, a saber, $\langle(J-H)\rangle = 0.70 \pm 0.06$ y $\langle(H-K)\rangle = 0.22 \pm 0.07$ respectivamente. Este resultado confirma lo encontrado por Visvanathan y Sandage (1977) para el visible: los colores de las galaxias elípticas y S0 de magnitudes similares, tienen también colores muy similares. Sin embargo, es posible establecer que la dispersión en los valores en (J-H) y (H-K) de nuestra muestra total (galaxias elípticas y S0) en aquellas galaxias con desviaciones mayores que

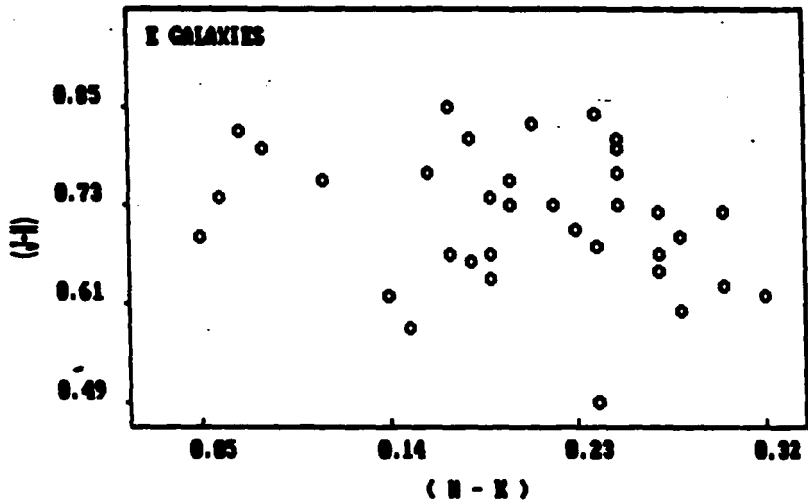


Figura IV.1a

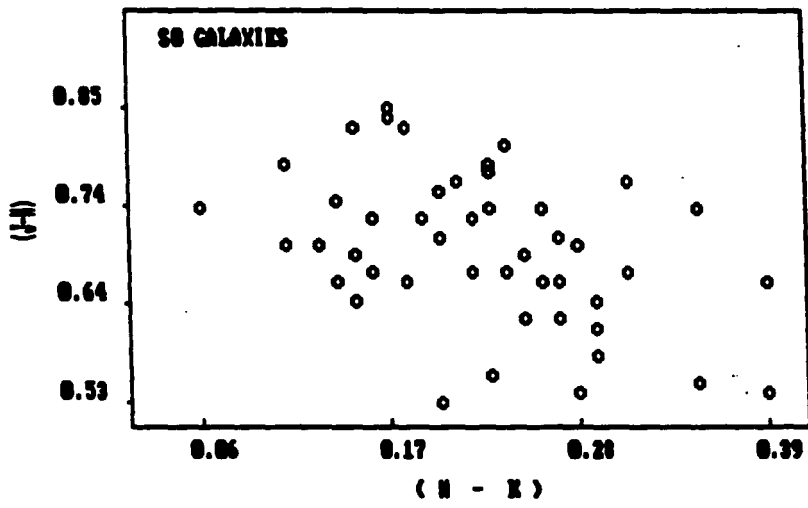


Figura IV.1b

la estandar podría ser indicativa de la presencia de un cierto grado de actividad nuclear (Cruz-González 1984).

D) (J-K).

El valor promedio de (J-K) para todos los tipos de galaxias estudiados (E y SO), tiene el mismo valor: $\langle(J-K)\rangle = 0.92$, con dispersiones de ± 0.09 y ± 0.06 respectivamente lo que nos indica la notable constancia de los colores infrarrojos de las galaxias con poblaciones estelares similares.

IV.4 LUMINOSIDAD VS. COLOR.

a) *Diagramas (J-H), (H-K) y (J-K) versus K.*

Visvanathan y Sandage (1977) encontraron una relación entre los colores de las galaxias elípticas y SO y su magnitud absoluta, en el sentido de que las galaxias más brillantes son más rojas. A su vez, Aaronson et al. (1981), estudiaron una muestra pequeña de galaxias en los cúmulos de Virgo y Coma y encontraron una relación color-luminosidad en el cercano infrarrojo. Este tipo de relación es importante pues es posible obtener a partir de ella el módulo de distancia relativo para galaxias en cúmulos. Cabe mencionar en éste punto que si bien Aaronson et al. (1981), han usado magnitudes absolutas M_V para construir sus diagramas, las magnitudes K aparentes usadas aquí, no introducen errores apreciables, pues las galaxias en Coma están prácticamente a la misma distancia. En el caso de un cúmulo cercano, ésta aproximación ya no es válida, como se verá en el

Capítulo V.

Consecuentemente, usando las magnitudes K corregidas al igual que los colores (J-H), (H-K) y (J-K) se construyen los diagramas color-magnitud cuyos resultados gráficos se presentan en las figuras IV.2a. a IV.2c. En éstos diagramas hemos graficado conjuntamente a las galaxias elípticas y S0. De la inspección del diagrama (J-H) versus K, es claro que para las galaxias elípticas, existe una relación razonablemente buena, sin embargo para las galaxias S0 no parece haber una relación entre el color y la magnitud. Es probable que debido a que la muestra que hemos estudiado no cubre un intervalo amplio de magnitudes, (sólo se observaron galaxias más brillantes que la magnitud $m_v = 16$) los efectos no mostrarán tendencias muy marcadas. Sin embargo, estudios recientes de las relaciones color-magnitud en el cercano IR y con intervalos más amplios en las magnitudes (Mobasher et al. 1986) muestran correlaciones comparativamente pobres para las galaxias S0.

El diagrama (H-K) versus K de la figura IV.2b muestra un comportamiento para las galaxias semejante al anterior, mientras que la gráfica de (J-K) versus K de la figura IV.2c, no muestra ninguna correlación entre color y magnitud infrarrojos en nuestra muestra, resultado que nuevamente señala la constancia del color (J-K) para las galaxias de tipos morfológicos tempranos.

Usando los datos publicados por diversos autores en otras bandas fotométricas, decidimos construir diagramas color-magnitud adicionales buscando combinaciones de diferencias en los valores

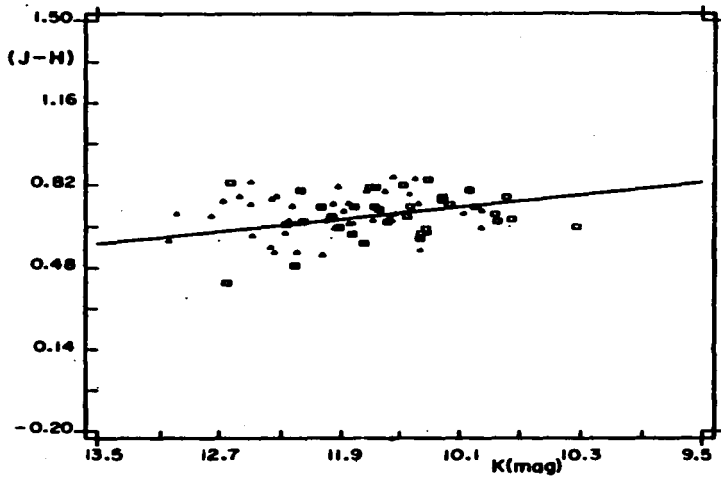


Figura IV.2a

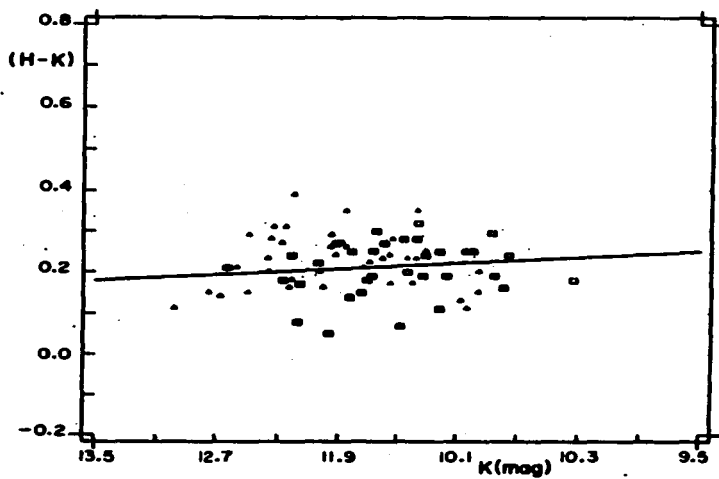


Figura IV.2b

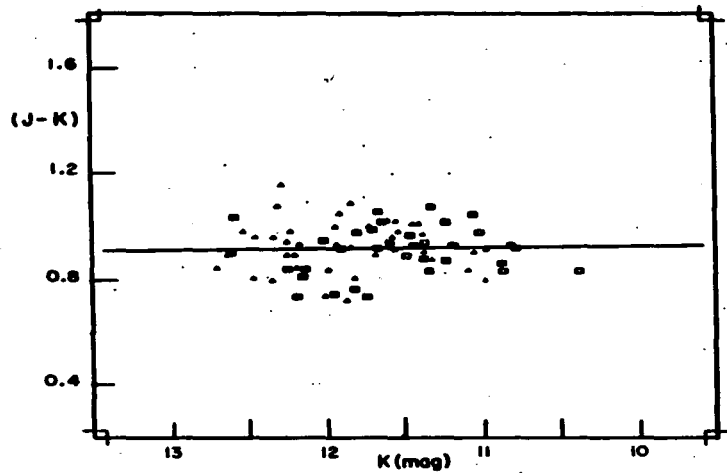


Figura IV.2c

de la magnitud en bandas que nos dieran relaciones color-magnitud más pronunciadas. A este respecto, se tomaron las magnitudes U y R de Strom y Strom (1978a) para las galaxias elípticas y SO de Coma, y que son comunes a nuestra muestra. También se adaptaron las magnitudes visuales V_{20} de Dressler (1984) para un cierto número de galaxias E y SO, de manera de poder compararlas con nuestras magnitudes K, lo cual será discutido en la siguiente sección.

b) Diagrama (U-K) versus K.

Para poder estimar colores compuestos de observaciones realizadas con aperturas diferentes y nuestros datos en el infrarrojo, obtenidos con una apertura de 14 segundos de arco, fué necesario corregirlas a un diámetro determinado. Esto es posible si suponemos que en nuestras galaxias no existen gradientes importantes de color (capítulo II, Sandage y Visvanathan 1978) y adoptamos los valores de U y R de la fotometría fotográfica de multiapertura simulada de Strom y Strom (1978a). Con estos datos interpolamos las magnitudes R para estimar la corrección apropiada ΔR , que se aplican a una apertura simulada de 14 segundos de arco para llevarla a la apertura de 30.6 segundos de arco publicada por los Strom. Suponiendo ahora que el cambio en el color (R-K) con la apertura es despreciable, (Strom y Strom 1978a encontraron que sólo el 10% de las elípticas de su muestra, tenían gradientes de color detectables) es posible derivar las correcciones que se deben aplicar a nuestras magnitudes K para llevarlas a una apertura simulada de 30.6

segundos de arco.

En la Tabla IV.2 se presentan las magnitudes $K_{30.6}$ estimadas de la forma antes descrita conjuntamente con los respectivos valores de $U_{30.6}$ y $R_{30.6}$. Asimismo se presentan los valores de los colores $(U-K)_{30.6}$; de $\log \sigma$, el logaritmo de la dispersión de velocidades y el índice de metalicidad Mg_2 , datos tomados de Dressler (1984), Dressler et al. (1987) y Davies et al. (1987) para 16 galaxias elípticas y S0 de la muestra común.

Usando las magnitudes $K_{30.6}$ así derivadas y las correspondientes $U_{30.6}$ (Strom y Strom 1978a), hemos construido el diagrama color-magnitud $(U-K)_{30.6}$ versus $K_{30.6}$ (magnitud definida más adelante) presentado en la Figura IV.3. A pesar de lo limitado de la muestra disponible, se aprecia una correlación entre el color y la luminosidad total, en el sentido de que las galaxias más luminosas son las más rojas en $(U-K)$, debido a la extensión al infrarrojo cercano de la relación investigada por vez primera por Poveda (1961) y más recientemente por Visvanathan y Sandage (1977). Este cambio de color con la luminosidad es probablemente debido al incremento del contenido de elementos pesados en las galaxias más luminosas.

Asimismo se investigaron otras posibles correlaciones entre $U_{30.6}$ y $R_{30.6}$ pero no se aprecia una tendencia importante hacia la relación color-magnitud entre el color $(U-R)_{30.6}$ y la magnitud $K_{30.6}$ en nuestros datos, implicando una cierta constancia del color $(U-R)$ en galaxias de tipo temprano.

TABLA IV.2. Magnitudes y colores de galaxias E y SO en Coma corregidas a la apertura de 30.6 segundos.

Nº Dress.	NGC, IC, RB	U _{30.6}	R _{30.6}	K _{30.6}	M _V	(U-K) _{30.6}	Log σ	Mg ₂
58	N4854	16.09	13.69	11.40	22.4	4.69	2.243	0.315
69	I3959	16.13	13.65	11.24	21.5	4.89	2.301	0.315
70	I3957	16.50	14.33	12.00	21.1	4.50	2.176	0.299
105	N4869	15.67	13.32	10.84	22.0	4.83	2.312	0.323
118	N4906	16.04	13.66	11.37	21.5	4.67	2.225	0.297
124	N4876	16.25	13.89	11.52	21.5	4.73	2.260	0.252
133	N4867	16.16	13.76	11.38	21.5	4.78	2.346	0.314
143	I4051	15.57	13.10	10.76	22.4	4.81	2.348	0.337
159	N4864	15.63	13.18	10.74	21.9	4.89	2.297	0.292
168	I4045	15.88	13.44	10.99	21.9	4.89	2.324	0.312
174	I4012	16.59	14.24	11.81	21.0	4.78	2.253	0.299
172	I4021	16.64	14.24	11.83	21.0	4.81	2.199	0.306
193	RB155	16.95	14.50	12.28	20.7	4.67	2.079	0.271
194	N4860	15.58	13.08	10.53	21.5	5.05	2.391	0.346
207	RB167	16.68	14.25	11.95	21.1	4.73	2.154	0.262x
217	N4881	15.68	13.23	10.93	22.1	4.75	2.340	0.293

* Valor de log σ y Mg₂ de Dressler (1984)
 Otros valores, de Davies et al. (1987)

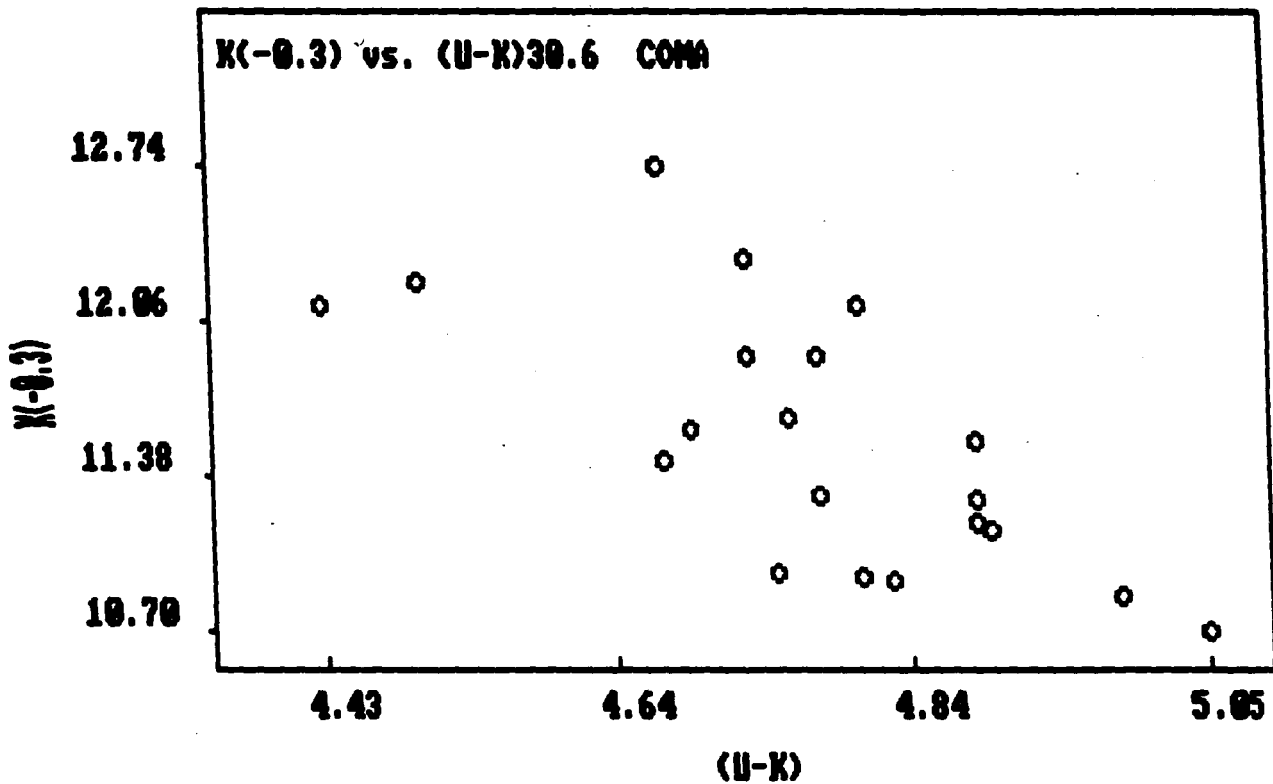


Figura IV.3

c) *Diagrama (V-K)_{-0.3} versus K_{-0.3}*

Para hacer una comparación válida de la fotometría realizada a una apertura constante en galaxias de diferentes diámetros, es necesario corregir esta fotometría a una fracción constante de la luz total de cada galaxia, esto es posible si conocemos los diámetros totales de las galaxias y la curva de crecimiento.

Hemos usado la fotometría en el cercano infrarrojo publicada por Frogel et al. (1978) y Aaronson et al. (1981) de algunas galaxias E y SO pertenecientes al cúmulo de Coma, para compararla con la nuestra. Esta comparación fué sólo posible para las magnitudes en la banda K, debido a la ausencia de curvas de crecimiento en las otras bandas.

Se adoptó la "curva de crecimiento standard" en K tomada del trabajo de Aaronson et al. (1981) y usando nuestras magnitudes K, construimos una curva de crecimiento a partir de los valores fotométricos bien determinados para ciertas galaxias. Esta curva describe la variación de los flujos medidos a diferentes aperturas normalizadas al diámetro efectivo deproyectado de la galaxia. Este es también un método gráfico para estimar radios en función de una apertura y magnitudes aparentes dadas.

El método no es muy confiable, en particular en el caso de la fotometría fotográfica, pero es una buena aproximación para determinar los diámetros de galaxias. Hecho esto hemos estimado las magnitudes $K_{-0.3}$ (la magnitud esperada a un diámetro

fraccional $A/D(0) = 0.5$) para aquellas galaxias, que tenían diámetros: $\log D(0)$ en el catálogo de de Vaucouleurs, de Vaucouleurs y Corwin (RC2, 1976).

En las Tablas IV.3a y IV.3b se listan, en la columna 1 el número de Dressler (1980), en la columna 2, la denominación de la galaxia por número en el NGC o en el IC. La columna 3 corresponde a los tipos morfológicos adoptados de Strom y Strom (1978a) y Dressler (1980). De las columnas 4 a la 6 se presentan las magnitudes corregidas por apertura para aquellas galaxias con diámetros conocidos, en las bandas azul, B, visual, V y J, H, y K del cercano IR. Los valores corregidos de los colores (V-K) $_{-0.3}$ para cada galaxia, se encuentran en la columna 9.

Las columnas 10, 11 y 12 incluyen los brillos superficiales, $\log I_e$ ($\mu_e = -2.5 \log I_e$) obtenidos a partir del brillo superficial promedio para las galaxias de Coma en común con nuestra muestra, derivados por Burstein et al. (1987). Las correcciones para $\log I_e$ en los diferentes colores, fueron estimadas utilizando los valores de (J-H), (H-K) y (J-K) listados en la Tabla IV.1.

La Tabla IV.3a se refiere a las galaxias E y SO cuyas magnitudes visuales, V fueron tomadas de Aaronson et al. (1981) y Persson et al. (1979) y corregidas a la apertura, $V_{-0.3}$; mientras que la Tabla IV.3b lista a las galaxias adicionales con valores de $V_{-0.3}$ estimados por nosotros a partir de los diámetros a V_{25} para las galaxias E del catálogo de Godwin y Peach (1977). En ambas tablas, también se presentan los valores promedio de $\log \sigma$

TABLA IV. 3a. Magnitudes y brillos superficiales de galaxias E y S0 en Coma corregidos por apertura a $\log [A/D(0)] = -0.3$.

Nº Dress.	NGC o IC	M.T.	B _{-0.3}	V _{-0.3}	J _{-0.3}	H _{-0.3}	K _{-0.3}	(V-K) _{-0.3}	J	$\log I_e$ H	K	$\log \sigma$	M _g
76	N4923	E	15.46	14.5	11.66	10.72	11.04	3.78	6.97	6.63	6.50	2.283	0.311
118	N4906	E	15.82	14.9	12.20	11.44	11.58	3.46	7.11	6.87	6.81	2.225	0.297
129	N4874	D	13.77	12.8	10.55	9.69	9.88	3.11	8.01	7.74	7.67	2.389	0.328
144	I4042	S0/a		14.8	11.80	10.86	11.11	3.94	8.04				
148	N4889	D	13.24	12.2	9.85	8.89	9.09	3.31	7.43	7.12	7.04	2.581	0.359
150	I4011	E	16.63	15.7	13.63	12.59	12.08	3.11	7.41	7.08	6.99	2.025	0.287
151	N4886	E	15.76	14.8	12.33	11.59	11.64	3.21	7.27	7.00	6.98	2.215	0.257
152	I3998	SBO		15.4	12.47	11.63	11.81	3.77					
170	I4026	SBO		15.3	12.89	11.99	12.34	3.31					
172	I4021	E	16.44	15.5	13.07	12.12	12.34	3.38	6.99	6.70	6.61	2.199	0.306
174	I4012	E	16.32	15.4	12.83	11.91	12.18	3.49	6.77	6.51	6.40	2.253	0.299
175	N4883	S0		14.2	12.03	11.14	11.36	3.76					
217	N4881	E	15.15	14.2	11.84	10.95	11.02	3.25	7.36	7.03	7.00	2.340	0.293

TABLA IV.3b. Magnitudes y brillos superficiales para galaxias E y SO en Coma corregidos por apertura, $\log (A/D(0)) = -0.3$.

N° Dress.	NGC or IC	M.T.	B _{-0.3}	V _{-0.3}	J _{-0.3}	H _{-0.3}	K _{-0.3}	(V-K) _{-0.3}	J	log I _e		log σ	M _B
										H	K		
31	N4839	E/SO	14.14	13.18	10.45	9.68	9.52	3.66	7.52	7.21	7.15	2.413	0.315
49	N4926	E	14.65	13.70	11.15	10.47	10.23	3.47	7.09	6.82	6.72	2.431	0.323
58	N4854	SO			12.41	11.74	11.58					2.243	0.315
69	I3959	E	15.71	14.18	12.47	11.80	11.53	3.28	7.10:	6.84:	6.73	2.301	0.315
70	I3957	E			13.32	12.41	12.23					2.176	0.299
105	N4869	E	15.45	14.50	12.00	11.16	10.92	3.53	7.10	6.77	6.67	2.312	0.323
121	N4898W	E			11.78	11.01	10.76					2.303	0.278
124	N4876	E	16.04	15.11	12.88	12.15	11.90	3.21	7.18	6.88	6.78	2.260	0.252
130	N4872	E/SO	15.97	14.94	12.36	11.55	11.30	3.64	6.63	6.30	6.20	2.326	0.307
133	N4867	E	16.00	15.08	12.29	11.48	11.30	3.78	6.68	6.35	6.28	2.346	0.314
143	I4051	E	15.01	14.04	11.87	11.14	10.94	3.10	7.76	7.47	7.39	2.348	0.337
153		E			13.73	13.01	12.74					2.130	0.287
159	N4864	E	15.79	14.84	12.04	11.28	11.17	3.67	7.02	6.71	6.67	2.297	0.292
168	I4045	E	15.66	14.69	12.16	11.56	11.28	3.41	6.90	6.65	6.54	2.324	0.312
193		E			13.67	13.04	12.74					2.079	0.271
194	N4860	E	15.09	14.07	11.68	10.95	10.70	3.37	7.08	6.79	6.69	2.391	0.346
207	RB167	E			13.17	12.51	12.33					2.167	0.273
239	N4841B	E			11.25	10.61	10.42					2.360	0.306
240	N4841A	E	14.40	13.46	10.84	10.15	9.92	3.54	7.26	7.31	6.94	2.422	0.324

(columna 13) y el índice Mg_2 (columna 14) para las galaxias elípticas comunes a nuestra muestra, (Davies et al. 1987) y que serán discutidos en las siguientes secciones. Con los datos listados en las Tablas IV.3a y IV.3b, para las magnitudes y colores (V-K) y K, se ha construido el diagrama (V-K) $_{-0.3}$ versus $K_{-0.3}$ presentado en la Figura IV.4.

El diagrama presentado en la Figura IV.4 indica nuevamente que existe una dependencia del color con la luminosidad, en el sentido de que las galaxias más brillantes y luminosas son también las más rojas, resultado consistente con anteriores determinaciones para las galaxias del campo y en cúmulos.

d) Relación de la luminosidad total versus el índice Mg_2

Se han utilizado los valores del índice Mg_2 para galaxias elípticas publicados por Davies et al. (1987) para investigar posibles correlaciones entre la luminosidad en diferentes bandas fotométricas y dicho índice metálico.

En las Figuras IV.5a a IV.5c se presenta la variación de Mg_2 con $K_{-0.3}$, $V_{0.3}$ y B_7 . Se observa que efectivamente hay una correlación entre estas cantidades para nuestra muestra de galaxias elípticas; esta relación es en el sentido de que las galaxias más luminosas tienen índices Mg_2 mayores.

e) Los colores en el cercano IR versus densidad superficial de galaxias

Se ha investigado la posible dependencia de los colores en el cercano infrarrojo, (J-H), (H-K) y (V-K) $_{-0.3}$ de las galaxias elípticas miembros del cúmulo de Coma, con la densidad proyectada de galaxias. Utilizando los valores obtenidos en éste estudio

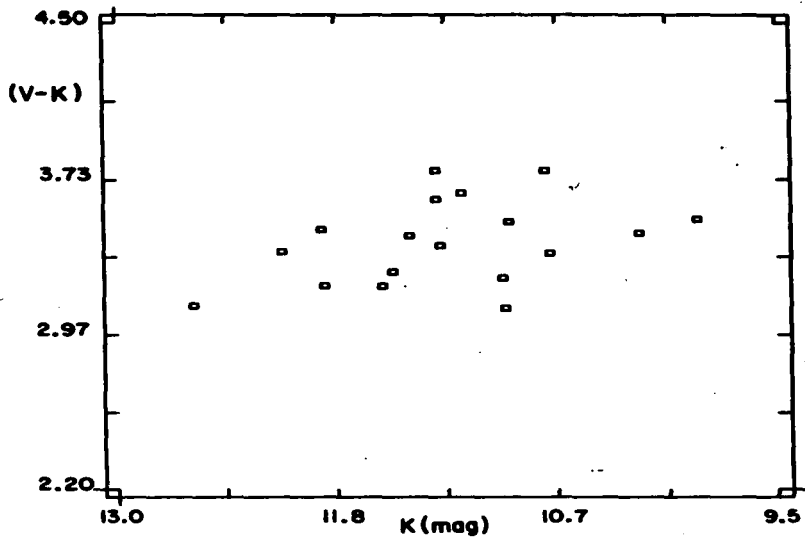


Figura IV.4

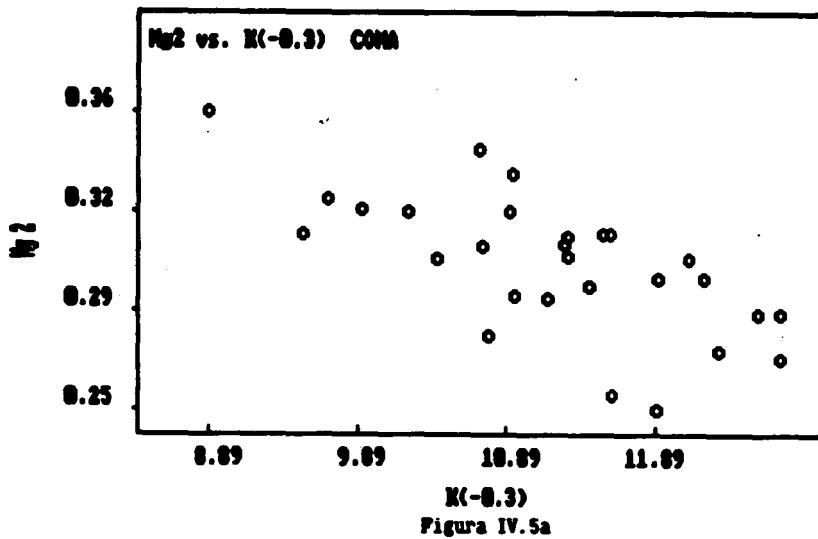
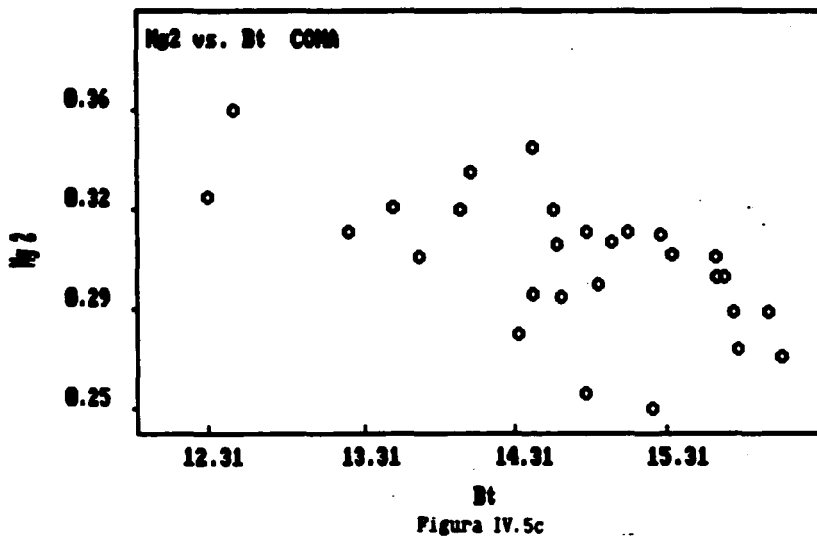
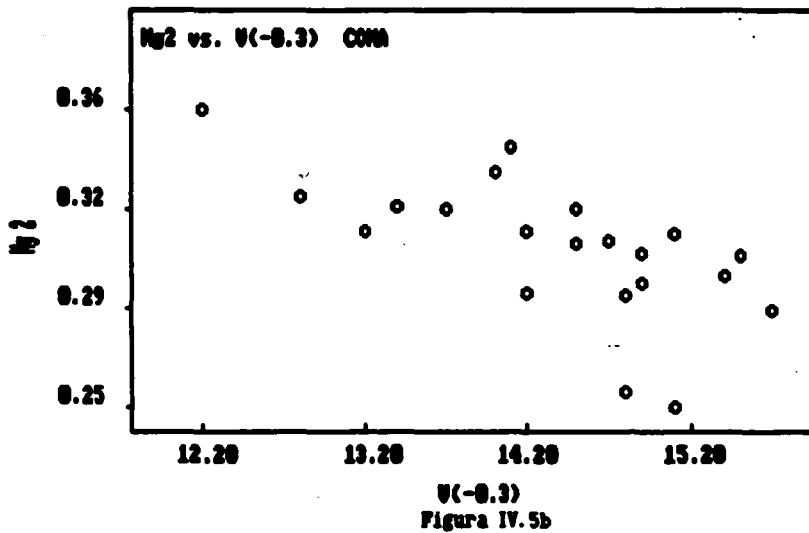


Figura IV.5a



para las magnitudes J, H y K y los colores listados en las Tablas IV.1 a la IV.3, hemos comparado los colores en el cercano infrarrojo y (V-K)_{0.3} con los resultados recientemente obtenidos de los contornos de densidad determinados de la densidad superficial local proyectada de galaxias en Coma (Recillas-Cruz et al. 1987). Se le asignó a cada galaxia su densidad superficial local proyectada de galaxias, dependiendo de su posición aparente dentro del cúmulo.

De la comparación se concluye lo siguiente: no se encontró una correlación significativa entre los colores de las galaxias en el cercano IR y su posición dentro del cúmulo. Es conveniente señalar que la muestra aquí estudiada, no incluyó un número importante de galaxias en las regiones menos densas del cúmulo, por lo que se hace necesario realizar observaciones de aquellas galaxias situadas en regiones menos densas para determinar si existe alguna diferencia del color de la galaxia como función de su posición en el cúmulo y por lo tanto de las condiciones ambientales que prevalecen en los cúmulos más densos.

f) Los colores en el cercano IR versus la elipticidad

En las figuras IV.6a y IV.6b, hemos graficado los colores (J-H) y (H-K) el cercano infrarrojo versus los valores de la elipticidad promedio de 26 galaxias elípticas estimadas de los datos de los Strom (Strom y Strom 1978). La inspección de las figuras muestra que no parece existir correlación alguna entre la elipticidad de galaxias elípticas y los colores en el cercano infrarrojo.

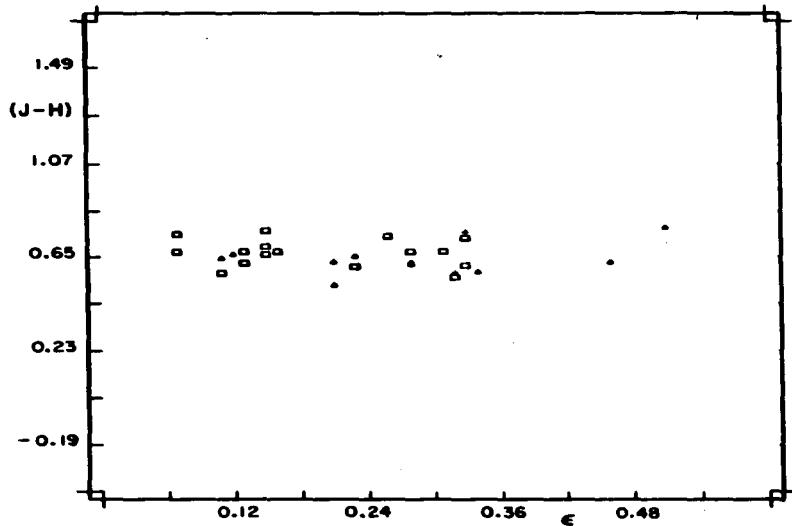


Figura IV.6a

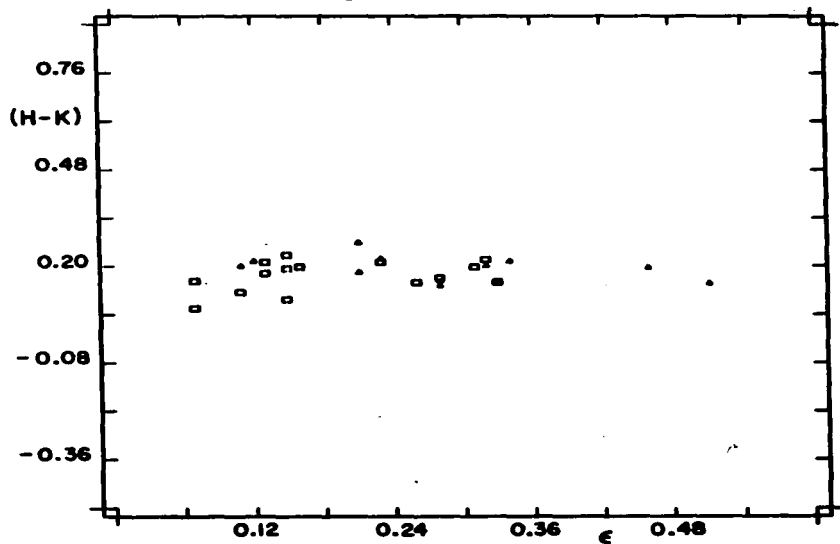


Figura IV.6b

IV.5 RELACIONES $L-\sigma$ Y $L-\sigma-I_0$.

a) La relación $L \propto \sigma^\alpha$ en el cercano infrarrojo.

Una vez obtenidas las magnitudes J, H y K para las galaxias miembros del cúmulo de Coma, y corregidas por efectos de recesión, enrojecimiento y apertura, se decidió investigar posibles relaciones entre los flujos infrarrojos y parámetros dinámicos como son: la dispersión de velocidades que es una medida de cuánta masa hay en el sistema (ver Capítulo II), $\log \sigma$ de manera análoga a la relación Faber-Jackson (1976). En esta sección se discuten solo las luminosidades en K, $L_K \propto \sigma^\alpha$, ya que los resultados en las bandas J y H son similares. Cuando se discutan las relaciones $L-\sigma-I_0$ en la sección siguiente, sí consideraremos las luminosidades en las tres bandas J, H y K del cercano infrarrojo y como lo demuestran las correlaciones presentadas en la Tabla IV.5, son en efecto similares.

Dressler (1984) realizó un estudio similar con magnitudes en el visible para 23 galaxias elípticas del cúmulo de Virgo y 30 galaxias elípticas de Coma para las cuales obtuvo las velocidades de dispersión por medio de técnicas de transformadas de Fourier (Simkin 1974, Sargent et al. 1977, Recillas-Cruz y Serrano 1983, Capítulo II) y usando luminosidades V_{25} , estimadas a partir de las magnitudes V_{25} (luz total estimada dentro de la isofota 25 mag segundo de arco $^{-2}$). Dressler encuentra una relación $L_D-\sigma$ de la forma $L \propto \sigma^3$ y argumenta que la relación Faber-Jackson (Faber y Jackson 1976) que establece que $L \propto \sigma^4$, resulta ser una función menos pendiente en $\log \sigma$; es decir, aparentemente, σ tiene una

dependencia en L que va como $1/3$ y no como $1/4$, como se esperaría de una relación teórica, determinada por consideraciones dinámicas usando el teorema virial entre las energías gravitacional y cinética estimando ésta última por medio de la dispersión de velocidades (Poveda 1958, 1961, Capítulo II) y despreciando toda posible contribución debida a rotación galáctica.

En un intento por reproducir los resultados de Dressler (1984) utilizando sus propios datos, repetimos las regresiones considerando a $\log \sigma$ como la variable dependiente, para las galaxias elípticas del cúmulo de Coma excluyendo del cálculo a las galaxias Dr 87 y Dr 107 cuyas dispersiones de velocidad son anormalmente pequeñas para su luminosidad (ver Fig. 6 de Dressler 1984). Este cálculo arroja una correlación entre L y $\log \sigma$ cuya pendiente es superior al valor de 3 encontrado por Dressler (1984).

Si bien los datos de la dispersión de velocidades son en general válidos solo para la región central de las galaxias, σ_c : observaciones a diferentes distancias del centro de algunas galaxias elípticas muestran que σ cae con la distancia radial al núcleo (Davies et al. 1983). Consecuentemente, las determinaciones de la dispersión de velocidades en Dressler (1984) y Davies et al. (1987), proporcionan σ al mismo radio en las galaxias de Virgo y Coma ya que han estimado la corrección que debe aplicarse por la distancia relativa entre los dos cúmulos. Por ende no se introducen errores importantes al

considerar las dispersiones de velocidad conjuntamente ya sea con las magnitudes limitadas por la apertura o bien con las magnitudes corregidas en las relaciones $L-\sigma$ estudiadas en este trabajo.

Usando los valores de las magnitudes corregidas por apertura $K_{-0.3}$ y los valores de $\log \sigma$ tomados de Dressler (1984) y Davies et al. (1987) listados en las Tablas IV.2, IV.3a y IV.3b, se estudió la relación L_K versus $\log \sigma$ para las luminosidades K estimadas a partir de magnitudes corregidas por el radio de la galaxia, $K_{-0.3}$. Los resultados se presentan gráficamente en la Fig. IV.7 y se resumen en la Tabla IV.4.

La inspección de la Tabla IV.4 nos permite comparar las correlaciones halladas (Dressler 1984) para la relación $L-\sigma$, de datos en diferentes longitudes de onda. Las relaciones $L \propto \sigma^\alpha$ en el cercano infrarrojo se aproximan más a la dependencia esperada a partir de consideraciones dinámicas (Davies et al. 1983). Estas pendientes más pronunciadas que se derivan de nuestros datos de luminosidades en K , indican que la banda fotométrica K , nos provee con una mejor estimación del contenido estelar total en galaxias de tipo temprano.

Usando datos existentes en la literatura, se decidió investigar las relaciones de luminosidad y dispersión de velocidades en otras bandas fotométricas, buscando ampliar el intervalo de longitudes de onda.

Para esto, se tomaron datos de Strom y Strom (1978a) en las

Log sigma vs. K(-0.3) COMA

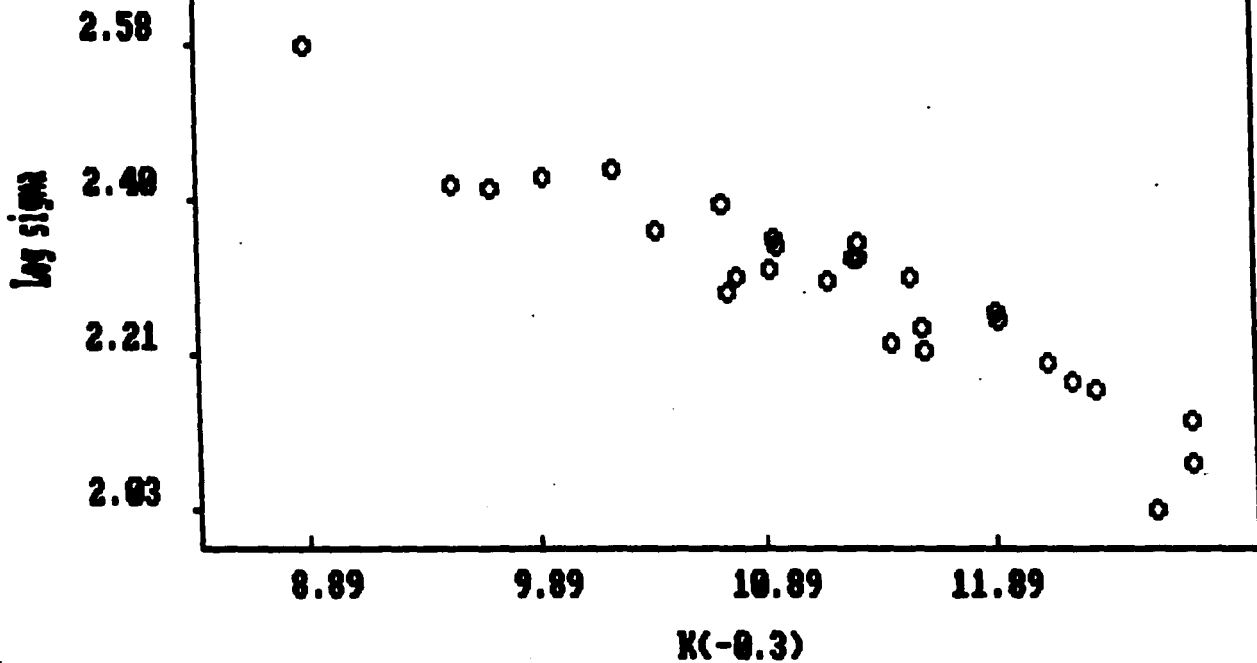


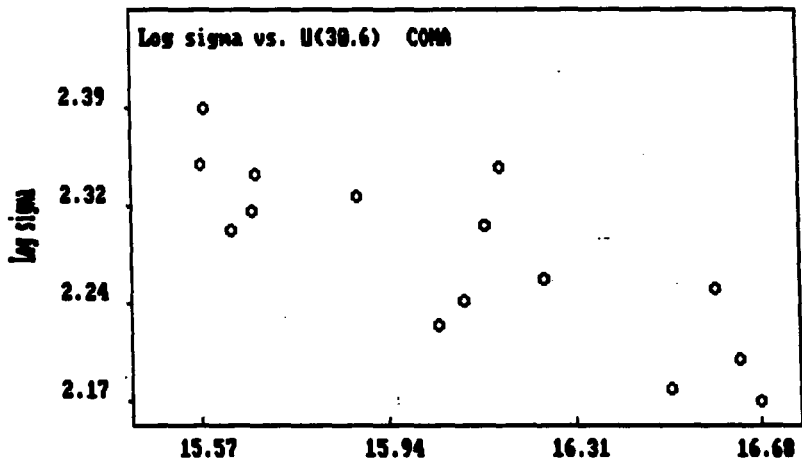
Figura IV.7

TABLA IV.4. Regresiones y coeficientes de correlación para la relación luminosidad versus $\log \sigma$.

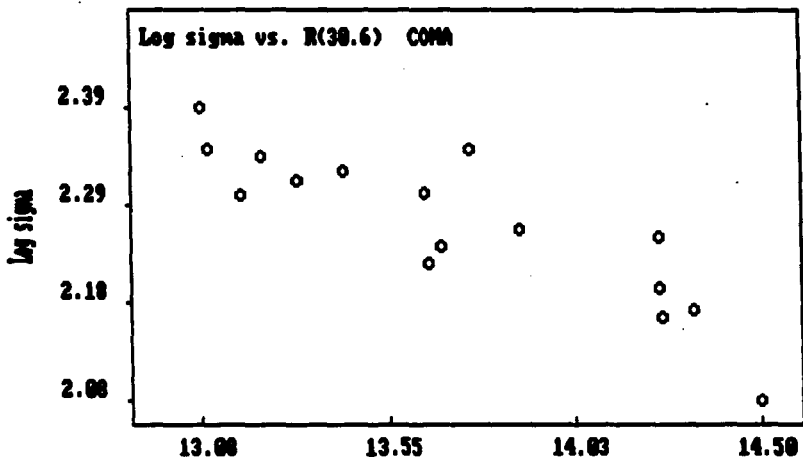
K_{30.0}:	K_{30.0} = -5.71 log σ + 24.28
16 galaxias	L_K = $\sigma^{2.28} \pm 0.30$
r ² (r)	0.807 (0.898)
R_{30.0}:	R_{30.0} = -5.02 log σ + 25.11
16 galaxias	L_R = $\sigma^{2.01} \pm 0.31$
r ² (r)	0.752 (0.867)
U_{30.0}:	U_{30.0} = -4.67 log σ + 26.70
16 galaxias	L_U = $\sigma^{1.87} \pm 0.29$
r ² (r)	0.749 (0.866)
K_{-0.3}:	K_{-0.3} = -6.42 log σ + 30.52
27 galaxias	L_K = $\sigma^{3.37} \pm 0.33$
r ² (r)	0.882 (0.939)
V_{-0.3}:	V_{-0.3} = -7.09 log σ + 30.82
21 galaxias	L_V = $\sigma^{2.84} \pm 0.37$
r ² (r)	0.756 (0.869)
B_T:	B_T = -7.88 log σ + 32.77
27 galaxias	L_B = $\sigma^{3.18} \pm 0.38$
r ² (r)	0.733 (0.856)

bandas $U_{30.6}$ y $R_{30.6}$ que se presentan en la Tabla IV.2. También se utilizaron nuevamente los datos para las magnitudes $V_{-0.3}$ de las Tablas IV.3a y IV.3b para encontrar la relación entre $\log \sigma$ y la luminosidad en el visible. En las Figuras IV.8a a IV.8c se muestran gráficamente el comportamiento de éstas relaciones. Las respectivas pendientes de las relaciones encontradas, así como los factores de correlación, se presentan nuevamente en la Tabla IV.4.

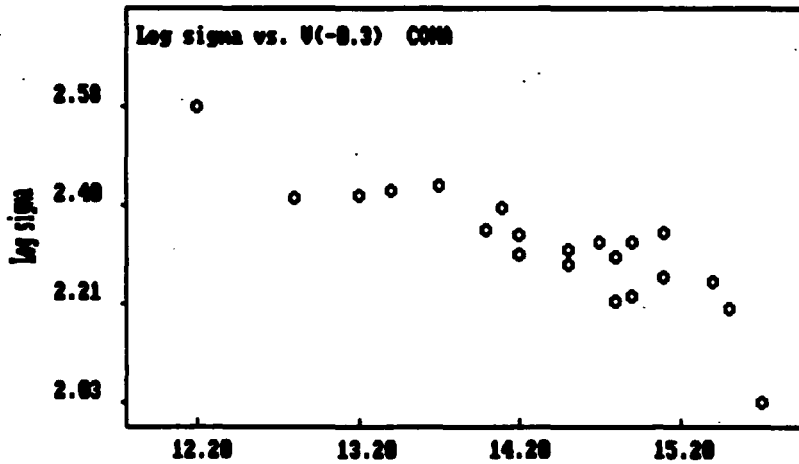
La comparación entre las relaciones $L-\sigma$ para bandas fotométricas diferentes debe hacerse considerando sólo datos que hayan sido medidos con la misma apertura o bien que hayan sido corregidos usando los diámetros galácticos existentes. De esta manera sólo la comparación entre las potencias de las relaciones $\log \sigma$ versus $U_{30.6}$, $R_{30.6}$ o $K_{30.6}$ es válida y demuestra que existe una tendencia sistemática a que el valor de la pendiente de α de la relación $L \propto \sigma^\alpha$, aumente monotónicamente con la longitud de onda, como se muestra en la Tabla IV.4. Cabe señalar que estas pendientes no deben compararse con el valor teórico esperado, $\alpha = 4$, pues estas magnitudes no han sido corregidas por el diámetro de las galaxias y por tanto no representan una buena estimación de la luminosidad total de las galaxias. Es conveniente hacer notar que el valor más pequeño de la relación $L \propto \sigma^\alpha$ ocurre para la regresión de $\log \sigma$ versus la magnitud U (a 30.6 μ segarco) situación que puede ser debida a la presencia, en la banda U , de efectos de "blanketing" o depresión del continuo en el ultravioleta óptico por líneas metálicas. Esto es, la banda U es particularmente sensible a la metalicidad de las estrellas



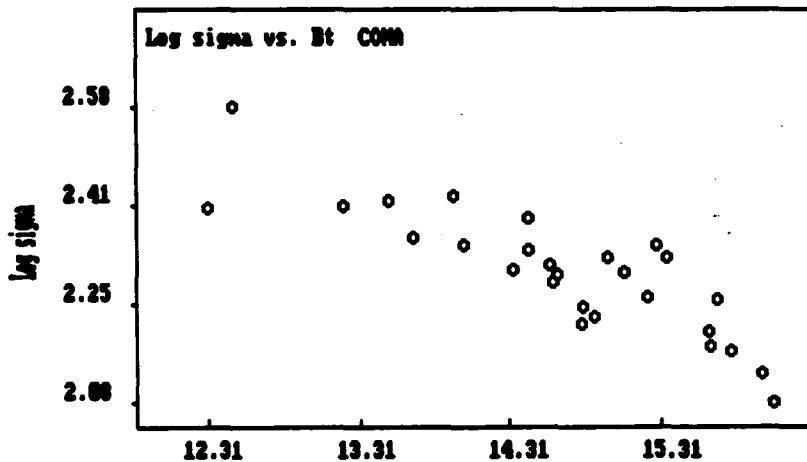
U(30.6)
Figura IV.8a



R(30.6)
Figura IV.8b



U(-0.3)
Figura IV.8c



Bt
Figura IV.8d

que dominan el espectro de las galaxias elípticas, las gigantes rojas.

A la distancia adoptada al cúmulo de Coma de 140 Mpc. ($H = 50 \text{ kms}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$) esta apertura de 30.6 segundos de arco corresponde a un diámetro lineal de 28 Kpc. En la medida en que las galaxias más brillantes tienen diámetros mayores que este tamaño de apertura lineal, las magnitudes y los colores observados estarán confinados a los 28 Kpc más centrales de las galaxias individuales.

Con respecto a la relación correspondiente a la banda $V_{-0.3}$ y la banda $K_{-0.3}$ con $\log \sigma$, esta última se puede considerar que es más representativa de la luminosidad total en K que $K_{30.6}$ como se discutió arriba; se observa que la pendiente de $K_{-0.3}$ es 3.37 ± 0.33 y es mayor que la pendiente de $V_{-0.3}$ cuyo valor es 2.84 ± 0.37 por lo que se encuentra una relación más pronunciada de $L \propto \sigma^m$ para el cercano infrarrojo.

Para investigar la correlación de L_B versus $\log \sigma$ en el azul, se tomaron las magnitudes totales en el azul, B_T , obtenidas por Burstein et al. (1987), para las galaxias elípticas en común con las observadas en el cercano infrarrojo. (Recillas-Cruz et al. 1987). Haciendo las regresiones para 27 galaxias en Coma, se encontró una correlación entre B_T y $\log \sigma$ en donde la pendiente de σ es 3.15 ± 0.36 , comparable a la pendiente de $V_{-0.3}$. Es de notar que este último valor puede ser mayor para la correlación determinada con las magnitudes B_T totales, ya que se incluye una mayor porción de la luz de la galaxia en la estimación de la

luminosidad. La pendiente en el azul es nuevamente, como en el caso de las luminosidades en el visual, menor que la pendiente en la banda K, del cercano infrarrojo.

En toda la anterior discusión, si bien tenemos datos de 28 galaxias en común con Burstein et al. (1987), hemos eliminado de las regresiones presentadas en esta y la próxima sección, a la galaxia Dr 150 (IC 4011), que tiene una dispersión de velocidad muy pequeña para su luminosidad probablemente debido a rotación, por lo tanto la muestra incorporada en las regresiones y que se presenta en la Tabla IV.5, incluye solo 27 galaxias.

Hemos también tomado en consideración el efecto en las regresiones si se incluyen las galaxias CD (Matthews, Morgan y Schmidt 1964) del cúmulo de Coma: Dr 129 (NGC 4874) y Dr 148 (NGC 4889) que muy probablemente sean galaxias originadas por fusión de otras galaxias más pequeñas (mergers) y cuyas propiedades estructurales pueden ser sustancialmente diferentes de las correspondientes a galaxias elípticas normales. Sin embargo, encontramos que estas no afectan mayormente los resultados de las regresiones con lo cual decidimos conservarlas dentro de la muestra.

Cuando se comparan las regresiones de la Tabla IV.4, es posible deducir que la pendiente para los valores de las magnitudes estimados para una apertura fija de 30.6 segundos de arco, muestran una pendiente menor que la correspondiente a la fotometría corregida por apertura ($K_{-0.3}$ y $V_{-0.3}$). Este efecto

muestra una vez más que para una apertura fija, las galaxias más extendidas (más luminosas en nuestra muestra), evidencian una deficiencia en luminosidad. Sin embargo, los valores corregidos para la magnitud K muestran una correlación razonablemente buena y un valor de la potencia de α mayor que los obtenidos por otros autores, entre otros Dressler (1984), y más cercano al valor esperado de 4.

En conclusión, se encuentra que:

En la mayoría de las bandas de magnitud del cercano infrarrojo investigadas, la relación $L_K \propto \sigma_\alpha$ tiene un valor más cercano a 4 que a 3. De lo cual se concluye que la pendiente de la relación $L-\sigma$ es más pronunciada para las longitudes de onda infrarrojas.

Las pendientes más pequeñas reportadas por otros autores (Dressler 1984) son producto posiblemente de la combinación de varios efectos, a saber:

- 1) Los sistemas están parcialmente soportados por rotación.
- 11) La población estelar que domina la luz en el cercano infrarrojo son las estrellas de la rama gigante, esta rama del diagrama H-R se desplaza a temperaturas efectivas menores a medida que la metalicidad aumenta. Este cambio implica una corrección bolométrica mayor para una correcta estimación de la luminosidad total a partir de observaciones en el azul. Esta corrección bolométrica resultaría ser mayor para las galaxias de mayor metalicidad que no es sencillo estimar

puesto que no existen observaciones de estrellas gigantes del campo y de cúmulos globulares con metalicidades tan altas como las observadas en galaxias elípticas. El no incorporar el efecto diferencial de la corrección bolométrica con la metalicidad subestima sensiblemente el intervalo de luminosidades muestreado, causando una disminución en la pendiente de la relación $L-\sigma$.

b) La relación $L \propto \sigma^\alpha I_s^{-\beta}$ en el cercano infrarrojo.

Recientemente se ha determinado que la relación Faber-Jackson (Faber y Jackson 1976), depende también del brillo superficial promedio I_s en galaxias elípticas (de Vaucouleurs y Olson 1982, Recillas-Cruz y Serrano 1986, Djorgovsky y Davis 1987, Dressler et al. 1987). En particular, se ha demostrado en el trabajo de la relación Recillas-Cruz-Serrano (Recillas-Cruz y Serrano 1986, Capítulo III) que las correlaciones entre r_e , L , y la densidad ambiental, son más significativas en la medida que la dispersión en el error es menor a 2σ , cuando se incluye el brillo superficial I_s en la correlación múltiple. Por otro lado, la relación con la dispersión de velocidades, radio efectivo, luminosidad y brillo superficial estudiada por Djorgovsky y Davis (1987) también indica una dependencia con el brillo superficial.

Para estudiar esta relación Faber-Jackson modificada, (Dressler et al. 1987) adoptamos los valores del brillo superficial promedio en el azul publicados por Burstein et al. (1987) y estimamos los brillos superficiales promedio I_J , I_H , I_K en las bandas J, H y K a partir de los colores observados y

corregidos listados en la Tabla IV.1 y derivamos correlaciones múltiples con los valores de $\log \sigma$ y las luminosidades determinadas en este trabajo en el cercano infrarrojo: L_J , L_H y L_K . Los resultados de las correlaciones múltiples con las relaciones lineales, dependencia en las potencias con los errores promedio estimados y el coeficiente de correlación para cada banda fotométrica estudiada, se presentan en la Tabla IV.5. Los brillos superficiales I_s para las bandas J, H y K, están listados en la Tabla IV.3a y IV.3b como $\log I_s(J)$, $\log I_s(H)$ y $\log I_s(K)$ y son los que se utilizaron para calcular las regresiones múltiples presentadas en la Tabla IV.5.

Del análisis de dicha tabla, nuevamente encontramos que la pendiente α en la relación $L-\sigma-I_s$, tomando en cuenta el efecto del brillo superficial, es más pronunciada para longitudes de onda en el cercano infrarrojo: $L_{IR} \propto \sigma^{3.48} I_s^{-0.19}$, mientras que la pendiente del brillo superficial, β , comparativamente al azul, es menos pronunciada. La relación correspondiente para el azul, es $L_B \propto \sigma^{2.73} I_s^{-0.51}$. Hemos adoptado para L_{IR} el promedio de los valores de las pendientes en el cercano IR: para α y β , de las expresiones de $L_J(-0.3)$, $L_H(-0.3)$ y $L_K(-0.3)$. En el azul, (B_7 y $B_{-0.3}$) adoptamos la magnitud en $B_{-0.3}$ corregida por apertura para asegurar que la fracción de galaxia que estamos considerando sea la misma tanto en el cercano infrarrojo como en el azul. Además que es posible apreciar de la Tabla IV.5, que esta banda presenta la mejor correlación entre $\log \sigma$ versus $B_{-0.3}$.

Los datos fotométricos que presentamos en las longitudes

TABLA IV.5. Correlaciones de L_n $\propto \sigma^\alpha I_n^{-\beta}$ para las diversas bandas fotométricas: B, V, J, H y K

B-0.3:
27 galaxias

$$\begin{aligned}\alpha &= 2.73 \pm 0.19 \\ \beta &= 0.51 \pm 0.08 \\ (r^2 &= 0.950)\end{aligned}$$

$$L_B(-0.3) \propto \sigma^{2.73} I_B^{-0.51}$$

B_v:
27 galaxias

$$\begin{aligned}\alpha &= 2.96 \pm 0.26 \\ \beta &= 0.54 \pm 0.09 \\ (r^2 &= 0.883)\end{aligned}$$

$$L_{Bv} \propto \sigma^{2.96} I_{Bv}^{-0.54}$$

V-0.3:
20 galaxias

$$\begin{aligned}\alpha &= 2.86 \pm 0.24 \\ \beta &= 0.48 \pm 0.08 \\ (r^2 &= 0.924)\end{aligned}$$

$$L_V(-0.3) \propto \sigma^{2.86} I_V^{-0.48}$$

J-0.3:
20 galaxias

$$\begin{aligned}\alpha &= 3.59 \pm 0.46 \\ \beta &= 0.14 \pm 0.12 \\ (r^2 &= 0.612)\end{aligned}$$

$$L_J(-0.3) \propto \sigma^{3.59} I_J^{-0.14}$$

H-0.3:
20 galaxias

$$\begin{aligned}\alpha &= 3.42 \pm 0.38 \\ \beta &= 0.23 \pm 0.11 \\ (r^2 &= 0.646)\end{aligned}$$

$$L_H(-0.3) \propto \sigma^{3.42} I_H^{-0.23}$$

K-0.3:
20 galaxias

$$\begin{aligned}\alpha &= 3.44 \pm 0.36 \\ \beta &= 0.21 \pm 0.10 \\ (r^2 &= 0.864)\end{aligned}$$

$$L_K(-0.3) \propto \sigma^{3.44} I_K^{-0.21}$$

de onda del cercano infrarrojo en la Tabla IV.5, incluye solo 20 galaxias corregidas por apertura (-0.3), consecuentemente, los factores de correlación y los errores promedio comparados con los factores de correlación y errores en las bandas azul y visual, (las magnitudes $B_{-0.3}$, B_7 y $V_{-0.3}$) y que incluyen datos para 28 galaxias (Burstein et al. 1987), son mayores. Esta muestra relativamente pequeña consigna una vez más, la necesidad de obtener datos dinámicos (velocidades de rotación y dispersión de velocidades) para galaxias elípticas, así como otros parámetros fundamentales como son: radios, brillos superficiales, elipticidades, etc.

Otro efecto importante encontrado en este análisis, es la evidente correlación inversa presente en todas las relaciones $L-\sigma-I_s$, entre la dispersión de velocidades σ y el brillo superficial I_s , ya notado por Dressler et al. (1987). Es particularmente significativo también, el comportamiento de la dependencia del brillo superficial con la longitud de onda: en el cercano infrarrojo, la potencia de I_s es menor, en tanto que en el visible, B_7 y V , las potencias parecen ser mayores lo cual parecería indicar que a medida que se muestrea una mayor población estelar de tipo tardío (luminosidades en el cercano IR), el efecto del brillo superficial en la relación $L-\sigma-I_s$ es menos importante. Asimismo, las correlaciones múltiples $L-\sigma-I_s$ son mucho mejores que aquéllas sin considerar al brillo superficial ($L-\sigma$), efecto encontrado por Recillas-Cruz y Serrano (1986) en seis cúmulos de galaxias con datos de brillos

superficiales en la banda R tomados de Strom y Strom (1978a, b, c).

IV.6 DEPENDENCIA DE LA RELACION M/L, L y BRILLO SUPERFICIAL

M/L es función de L?

Dressler et al. (1987) han discutido la relación inversa entre la luminosidad total y el brillo superficial promedio I_e y correctamente interpretan que esta relación implica que el cociente M/L (masa-luminosidad) cambia tanto como una función de la luminosidad total como del brillo superficial y que esto significa de hecho, un efecto de cambio en la población estelar.

Al introducir el término en el brillo superficial en la relación masa-luminosidad en el azul, Dressler et al. (1987) también encuentran que la dependencia de M/L_e es $L_e^{1/4} I_e^{1/20}$, o bien, el cociente M/L_e es bastante insensible al brillo superficial. La variación que predicen Dressler et al. (1987) de M/L_e con L_e es ≈ 3 , para un intervalo de 5 magnitudes, se debe en parte a la corrección bolométrica que debe aplicarse y al hecho de que las galaxias más luminosas sean sistemáticamente más rojas. En contraste, vemos que al obtener la fotometría en la banda K y en general en toda la región del cercano IR, estamos efectivamente disminuyendo el efecto de una corrección bolométrica dependiente de la metalicidad. Para las galaxias más luminosas, la luz resulta más roja, según los resultados obtenidos en la sección anterior. Las gigantes son entonces, más prominentes en K. L_K al igual que L_{IR} , es en efecto un excelente indicador del contenido estelar presente, es decir de la masa

invertida en estrellas de tipo tardío, en las galaxias elípticas.

La relación $L \propto \sigma^\alpha I_e^{-\beta}$ conjuntamente con la relación virial $\sigma^2 \propto M/R$ (Poveda 1961) y la definición del brillo superficial $I_e \propto L/R^2$ contienen de manera implícita una relación entre el cociente M/L , la luminosidad y el brillo superficial de las galaxias elípticas, que puede expresarse de la siguiente manera: Si tenemos entonces:

$$L \propto \sigma^\alpha I_e^{-\beta} \quad \text{IV.1}$$

usando la relación virial:

$$\sigma^2 \propto \frac{M}{R} \quad \text{IV.2}$$

y

$$L \propto \left(\frac{M}{L} \right)^{-1} \sigma^2 R \quad \text{IV.3}$$

de aquí con la definición de brillo superficial:

$$I_e \propto \frac{L}{R^2} \quad \text{IV.4}$$

se obtiene:

$$L \propto \left(\frac{M}{L} \right)^{-2} I_e^{-1} \sigma^4 \quad \text{IV.5}$$

y con la expresión IV.1 el cociente M/L es:

$$\frac{M}{L} \propto \sigma^{(4-\alpha)/2} I_e^{(\beta-1)/2} \quad \text{IV.6}$$

donde la forma más general de esta expresión sería:

$$\frac{M}{L} \propto \sigma^A I_e^B \quad \text{IV.7}$$

sustituyendo IV.7 en la ecuación IV.5, se obtiene para $L \propto \sigma^\alpha I_e^{-\beta}$:

$$\alpha = 4 - 2A \quad \text{de donde} \quad A = (4 - \alpha) / 2$$

$$\beta = 1+2B$$

$$B = (\beta-1)/2$$

IV.8

Con la ayuda de la ecuación IV.1 eliminamos de la expresión IV.7 la dispersión de velocidades, con lo cual llegamos a la relación final,

$$\frac{M}{L} \propto L^{\gamma} I_e^{\kappa} \quad \text{donde} \quad \begin{aligned} \gamma &= A/\alpha \\ \kappa &= B + \beta A/\alpha \end{aligned} \quad \text{IV.9}$$

De los resultados resumidos en la Tabla IV.5, se determinan los valores de los exponentes γ y κ para las expresiones IV.9. En esta forma obtenemos las siguientes relaciones para el cociente M/L en el visual y el cercano IR:

$$M/L_{IR} \propto L_{IR}^{\kappa} I_e^{-\gamma} ; \text{ donde } \kappa = 0.04 \text{ y } \gamma = 0.40 \quad \text{IV.10}$$

$$M/L_{\theta} \propto L_{\theta}^{\kappa} I_e^{-\gamma} ; \text{ donde } \kappa = 0.25 \text{ y } \gamma = 0.20 \quad \text{IV.11}$$

A partir de los valores típicos de α y β en las relaciones $L-\sigma-I_e$ derivados de los estudios en el azul y en el cercano infrarrojo, la dependencia del cociente M/L con la luminosidad va como $\kappa = 0.25$ para las luminosidades azul y visual, mientras que esta dependencia es mucho menos pronunciada para las luminosidades inferidas en longitudes de onda del cercano infrarrojo.

La interpretación de esta diferencia es muy clara, la luminosidad total de las galaxias se recobra a longitudes de onda del cercano IR puesto que tanto el efecto del "blanketing" y el corrimiento hacia temperaturas efectivas menores de la rama gigante con el aumento de la metalicidad, son esencialmente nulos

a estas longitudes de onda. Este cociente M/L , independiente de la luminosidad -en el cercano infrarrojo- para el extremo brillante de la función de luminosidad de las galaxias elípticas, implica que no se incrementa la masa "invisible" en estos sistemas. Otros estudios a longitudes de onda del azul y visual, han sobreestimado el valor de κ debido a correcciones bolométricas incorrectamente obtenidas y necesarias para transformar en luminosidades totales las luminosidades determinadas a estas bandas fotométricas.

Es aparente de nuestros resultados a longitudes de onda del cercano IR, por un lado, que el cociente M/L no depende fuertemente de la luminosidad de la galaxia en aparente contradicción con los resultados de otros autores, (Dressler et al. 1987) implicando que la dependencia inferida de M/L con la luminosidad es espuria, y consecuencia de una corrección bolométrica deficiente. Schechter (1980) encontró incluso en el azul, al graficar M/L versus M_B , que no existía relación alguna. Dressler et al. (1987) esperarían encontrar $M/L \propto L^{0.18}$ mientras que nosotros estamos encontrando $M/L_K \propto L^{0.04}$ que es un factor de 4 mayor de lo que resultaría al considerar la corrección bolométrica que Dressler et al. (1987) suponen. La corrección bolométrica está en realidad subestimada, y es más próxima al valor encontrado por nosotros.

Hemos confirmado por otro lado, que la correlación inversa entre la luminosidad y el brillo superficial, si bien débil, existe. También encontramos una dependencia real del cociente M/L

con el brillo superficial lo cual implica que en los sistemas "distendidos" que son las galaxias elípticas más luminosas y extendidas, existe un aumento progresivo de objetos poco luminosos para su masa.

IV.7 DISCUSION.

Al combinar la relación L versus brillo superficial con los resultados sobre el cociente M/L en el cercano infrarrojo que resulta ser mayormente independiente de la luminosidad mas no del brillo superficial, inferimos lo siguiente:

Puesto que los estudios en el infrarrojo no se ven afectados por incertidumbres en la corrección bolométrica, la dependencia residual del cociente M/L con la luminosidad debe ser real y podría implicar que de existir "masa invisible" en las galaxias elípticas (agujeros negros o enanas rojas) esta debe estar presente de manera más importante en los sistemas "distendidos" y más luminosos. Estos sistemas son precisamente aquellos soportados por una distribución anisotrópica de velocidades conjuntamente con una baja velocidad de rotación (Davies et al. 1983)

Podemos concluir diciendo que los sistemas de menor luminosidad y más concentrados en todo caso tienen un cociente M/L menor, esto implica por lo tanto, que los sistemas distendidos de alto M/L no pueden ser resultado de procesos de fusión de galaxias más pequeñas puesto que estas tendrían cocientes M/L bajos y al fusionarse, el producto final o

"merger", no puede tener un cociente M/L mayor que el de sus predecesores. Estos sistemas, de bajo brillo superficial, deben sus valores relativamente altos de M/L , muy probablemente, a cambios en su función de luminosidad.

El intervalo de variación de los brillos superficiales para galaxias elípticas en el cercano infrarrojo, es menor que en el azul, este hecho se traduce en un aumento de la potencia del brillo superficial en la relación $L-\sigma-I_0$, posiblemente debido a que por un lado la extinción interna es menos importante a estas bandas fotométricas y que por otro lado recobramos la deficiencia en el flujo debido a metalicidad.

Kjaergaard (1987) ha encontrado recientemente, al calcular modelos de síntesis espectral para galaxias elípticas, que las contribuciones relativas en el cercano IR de la luz de estrellas enanas M a la de gigantes M es una función de la relación masa-luminosidad. Cuando la relación M/L_0 es ≈ 10 las enanas M contribuyen más a la luz en la banda K mientras que las gigantes contribuyen comparativamente más luz cuando $M/L_0 \approx 2$. Esto significa que si las galaxias tienen una M/L grande tendrán también una mayor contribución de enanas, i.e. un número mayor de estrellas de poca masa. Esta inferencia teórica podría explicar nuestros resultados: la relación M/L en el cercano IR es casi independiente de la luminosidad total porque (una vez más), se recobra la luz de la componente estelar más importante de las galaxias elípticas.

Regresando a la variación de la relación M/L con el brillo

superficial, el hecho de que las galaxias de alto brillo superficial y que son las menos luminosas ($M_V > -20.0$) tengan una relación M/L menor, implica, según nuestros resultados, que sus estrellas son más masivas comparativamente a las estrellas encontradas en sistemas más luminosos.

Este resultado, fundamental para explicar la formación de galaxias elípticas apunta hacia un mecanismo más general que el de la fusión de galaxias como algunos autores proponen (Schweizer 1986) y que explique, entre otras cosas, algunas de las conclusiones de este trabajo, y más globalmente, el glosario de propiedades y relaciones fundamentales que se han establecido en galaxias elípticas y que han sido descritas y planteadas en los Capítulos II y III.

CAPITULO IV

REFERENCIAS

- Aaronson, M., Persson, S.E., y Frogel, J.A. 1981, *Astrophys. J.*, 245, 18.
- Binggeli, B., Sandage, A. y Tarenghi, M. 1984, *Astron. J.*, 89, 64.
- Burstein, D., y Heiles, K. 1982, *Astron. J.*, 87, 1165.
- Burstein, D., Faber, S.M., Gaskell, C.M., y Krumm, N. 1984, *Astrophys. J.*, 287, 566.
- Burstein, D., Davies, R.L., Dressler, A., Faber, S.M., Stone, R., Lynden-Bell, D., Terlevich, R.J., y Wegner, G. 1987, *Astrophys. J. Suppl.*, 64, 601.
- Cruz-González, I. 1984, Ph.D. Thesis, Harvard University.
- Cruz-González, I., Recillas-Cruz, E., y Carrasco, L. 1987, en preparación.
- Davies, R.L., Efstathiou, G., Fall, S.M., Illingworth, G. y Schechter, P.L. 1983, *Astrophys. J.*, 266, 41.
- Davies, R.L., Burstein, D., Dressler, A., Faber, S.M., Lynden-Bell, D., Terlevich, R.J., y Wegner, G. 1987, *Astrophys. J. Suppl.*, 64, 581.
- de Vaucouleurs, G. y Olson, D.W. 1982, *Astrophys. J.* 256, 346.
- de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., y Corwin, H.R. 1976, *Second Reference Catalog of Bright Galaxies* (Austin: University of Texas Press) (RC2).
- Djorgovski, S., y Davis, M. 1987, *Astrophys. J.*, 313, 59.
- Dressler, A. 1980, *Astrophys. J. Suppl.*, 42, 565.
- Dressler, A. 1984, *Astrophys. J.*, 281, 512.
- Dressler, A., Lynden-Bell, D., Burstein, D., Davies, R.L., Faber, S.M., Terlevich, R.J., y Wegner, G. 1987, *Astrophys. J.*, 313, 42.
- Faber, S.M. y Jackson, R. 1976, *Astrophys. J.*, 204, 668.
- Faber, S.M., Burstein, D. y Dressler, A. 1977, *Astronom. J.*, 82, 941.
- Frogel, J.A., y Whitford, A.E. 1987, pre-tiro, NOAO.

- Frogel, J.A., Persson, S.E., Aaronson, M., y Matthews, K. 1978, *Astrophys. J.*, 220, 75.
- Godwin, J.G., y Peach, J.V. 1977, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 161, 323.
- Johnson, H.L. 1966, *Astrophys. J.*, 143, 187.
- Kjaergaard, P. 1987, *Astron. Astrophys.*, 176, 210.
- Kormendy, J. 1977, *Astrophys. J.*, 216, 333.
- Matthews, T.A., Morgan, W.W., y Schmidt, M. 1964, *Astrophys. J.*, 140, 35.
- Mobasher, B., Ellis, R.S., y Sharples, R.M. 1986, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 223, 11.
- Oke, J.B. y Sandage A. 1968, *Astrophys. J.*, 154, 21.
- Persson, S.E., Frogel, J.A., y Aaronson, M. 1979, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 39, 61.
- Poveda, A. 1958, *Bol. Obs. Tonan. Tacubaya*, N°17, 3.
- Poveda, A. 1961, *Astrophys. J.*, 134, 910.
- Recillas-Cruz, E., y Serrano, P.G., A. 1983, *Bol. S.M.F.*,
- Recillas-Cruz, E., y Serrano P.G., A. 1986, pretexto.
- Recillas-Cruz, E., Pimentel, P., y Serrano P.-G., A. 1987, *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, 14, 78.
- Roth, M., Iriarte, A., Tapia, M., y Reséndiz, G. 1984, *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, 9, 25.
- Simkin, S.M. 1974, *Astron. & Astrophys.*, 31, 129.
- Sandage, A. 1972, *Astrophys. J.*, 176, 21.
- Sandage, A. 1973, *Astrophys. J.*, 183, 711.
- Sargent, W.L.W., Schechter, P.L., Boksenberg, A. y Shortridge, K. 1977, *Astrophys. J.*, 212, 326.
- Schweizer, F. 1986, *Science*, 231, 227.
- Strom, K.M., y Strom, S.E. 1978a, *Astron. J.*, 83, 73.
- Strom, S.E., y Strom, K.M. 1978b, *Astron. J.*, 83, 732.
- Strom, K.M., y Strom, S.E. 1978c, *Astron. J.*, 83, 1293.
- Terlevich, R., Davies, R.L., Faber, S.M. y Burstein, D. 1981, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 196, 381.

Visvanathan, N. y Sandage, A. 1977. *Astrophys. J.*, 216, 214.

CAPITULO V

CUMULOS DE GALAXIAS Y FORMACION DE GALAXIAS: COMA Y VIRGO.

V.1 INTRODUCCION

En este capítulo, se discuten las observaciones efectuadas para 57 galaxias del cúmulo de Virgo en el cercano IR en las bandas J, H, y K. Se establecen las relaciones entre los colores y las luminosidades con la dispersión de velocidades e índice de metalicidad Mg_2 así como con el brillo superficial para 21 galaxias elípticas y S0, miembros de este cúmulo, de la manera descrita en el capítulo anterior para el cúmulo de Coma. Se discutirán los resultados comparando las relaciones entre la luminosidad, dispersión de velocidades y brillo superficial, tanto en el azul como en el cercano IR, obtenidas en Coma y Virgo y se analizan los resultados obtenidos a la luz de las teorías de formación de galaxias que han sido propuestos. Discutir la fotometría en el cercano IR del cúmulo de Virgo reviste una importancia fundamental para las conclusiones que se derivan del presente trabajo, puesto que Virgo es un cúmulo de baja densidad y la comparación de sus resultados y los de Coma (que es un cúmulo mucho más denso), será determinante para el esquema de formación de galaxias que proponemos.

V.2 OBSERVACIONES EN EL CERCANO IR DEL CUMULO DE VIRGO

La obtención de las magnitudes J, H y K y el método usado para reducir y corregir los valores de la fotometría en el cercano IR son las mismas que las aplicadas a la fotometría en el cercano IR del cúmulo de Coma, por lo que no repetiremos los detalles de dichas reducciones y correcciones. Sin embargo se mencionarán a continuación, algunos de los detalles de las observaciones realizadas en las galaxias miembros del cúmulo de Virgo.

Las observaciones realizadas en el cúmulo de Virgo fueron efectuadas en la primavera de 1987 (marzo-abril) durante 13 noches fotométricas con el telescopio reflector de 2.12m. del OAN en San Pedro Mártir, B.C. y con el fotómetro IR de InSb (ver Capítulo IV). Se observaron 57 galaxias, de todo tipo morfológico. Los datos obtenidos se presentan en la Tabla V.1. La Columna 1 contiene la denominación asignada del Catálogo del Cúmulo de Virgo (Virgo Cluster Catalog, Binggeli, Sandage y Tammann 1985). En la Columna 2 de la misma Tabla se listan otras denominaciones: NGC o IC, mientras que en las Columnas 3 y 4 se listan el tipo morfológico y la magnitud total B_T en el azul, según el mismo Catálogo de Binggeli et al. Las magnitudes J, H y K observadas por nosotros conjuntamente con los errores estimados se encuentran las Columnas 5, 6 y 7 y sus colores corregidos por enrojecimiento y corrimiento al rojo, se muestran en las Columnas 8, 9 y 10. En la Columna 11, damos los valores del tiro en segundos de arco, utilizado en cada una de las observaciones.

TABLA V.1. Fotometría JHK de galaxias en el cúmulo de Virgo

VCC	NGC IC	T.M.	B _r	J	H	K	(J-H)	(H-K) Corregidos	(J-K)	Tiro (seg arco)			
49	4168	E2	12.21	11.100	.01	10.423	.02	10.243	.02	0.673	0.153	0.825	85
122	4200	S0	13.85	12.310	.01	11.663	.02	11.463	.03	0.643	0.172	0.815	85
166	4215	S0	13.12	11.044	.01	10.386	.02	10.246	.02	0.655	0.117	0.770	85
167	4216	Sb	10.97	9.520	.01	8.813	.01	8.613	.02	0.707	0.199	0.905	85
222	4235	Sa	12.62	11.740	.01	11.053	.02	10.793	.02	0.683	0.231	0.913	85
307	4254	Sc	10.43	10.940	.01	10.273	.02	9.943	.02	0.663	0.302	0.965	85
341	4260	SBa	11.31	10.034	.01	9.356	.01	9.086	.01	0.675	0.177	0.852	85
345	4261	E2	11.31	10.034	.01	9.356	.01	9.086	.01	0.674	0.244	0.919	85
355	4262	SBO	12.41	10.140	.01	9.423	.02	9.213	.02	0.715	0.194	0.909	85
648	4339	S0	12.32	11.050	.01	10.356	.02	10.098	.01	0.692	0.243	0.935	90
654	4340	SBO	12.03	10.854	.01	10.176	.02	9.956	.01	0.676	0.209	0.886	85
657	4342	S0	13.54	10.490	.01	9.746	.01	9.478	.01	0.743	0.260	1.003	90
685	4350	S0	11.99	9.984	.01	9.216	.01	9.016	.02	0.766	0.186	0.951	85
731	4365	E3	10.51	9.810	.01	9.146	.01	8.848	.01	0.662	0.284	0.945	90
758	4370	S0	13.69	11.690	.01	10.896	.01	10.518	.01	0.793	0.369	1.162	90
759	4371	SBO	11.80	10.466	.02	9.748	.02	9.568	.02	0.716	0.169	0.885	89
763	4374	E1	10.26	9.282	.01	8.551	.02	8.363	.01	0.729	0.176	0.906	88
798	4382	SOp	10.09	9.624	.01	8.976	.01	8.766	.02	0.647	0.201	0.848	85
828	4387	E5	13.02	11.102	.02	10.391	.02	10.223	.01	0.710	0.161	0.871	88
881	4406	S0/E	10.06	9.682	.01	8.971	.02	8.803	.01	0.707	0.165	0.876	88
944	4417	S0	12.08	10.356	.02	9.632	.01	9.452	.01	0.723	0.170	0.889	85
979	4422	Sap	12.32	---	---	11.572	.02	---	---	---	---	---	85
1025	4434	EO/SO	12.99	11.086	.02	10.342	.02	10.142	.01	0.742	0.188	0.932	85
1062	4442	SBO	11.40	9.736	.02	9.042	.01	8.822	.01	0.693	0.214	0.907	85
1110	4450	Sabp	10.93	10.414	.01	9.736	.01	9.496	.01	0.675	0.217	0.892	85

TABLE V. 1 (cont.)

1158	4461	Sa	12.09	10.370	.02	9.685	.02	9.453	.02	0.682	0.210	0.891	90
1178	4464	E3	13.70	11.176	.02	10.472	.02	10.242	.01	0.702	0.216	0.918	85
1190	4469	Sa	12.22	11.180	.02	10.397	.01	10.155	.04	0.782	0.236	1.018	87
1196	4468	SO/a	13.80	12.440	.03	11.795	.03	11.623	.02	0.644	0.162	0.804	90
1205	4470	Scp	13.04	12.760	.02	12.057	.02	11.935	.04	0.699	0.095	0.799	87
1226	4472	E/SO	9.31	9.162	.01	8.489	.02	8.253	.01	0.671	0.225	0.896	88
1231	4473	E5	11.10	9.630	.02	8.937	.02	8.723	.02	0.690	0.188	0.877	90
1242	4474	SO	12.60	10.904	.01	10.206	.01	10.016	.02	0.695	0.171	0.867	85
1253	4477	SBO/a	11.31	10.100	.02	9.415	.02	9.203	.02	0.683	0.196	0.879	90
1279	4478	E2	12.51	10.500	.02	9.835	.02	9.573	.01	0.663	0.246	0.909	90
1316	4486	E0	9.58	9.680	.02	8.905	.02	8.743	.02	0.773	0.147	0.920	90
1321	4489	SO	12.84	11.634	.02	10.926	.02	10.696	.02	0.706	0.219	0.926	85
1401	4501	Sbc	10.27	10.100	.02	9.385	.02	9.113	.01	0.711	0.245	0.957	90
1412	4503	Sa	12.12	10.513	.02	9.778	.02	9.574	.01	0.733	0.188	0.921	88
1508	4519	SBC	12.34	12.882	.01	12.181	.04	12.323	.02	0.699	-0.156	0.543	88
1535	4526	SO	10.61	9.472	.01	8.691	.02	8.423	.01	0.780	0.262	1.042	88
1555	4535	SBC	10.51	11.662	.02	10.911	.02	10.633	.01	0.748	0.255	1.003	88
1619	4550	E7/SO	12.50	10.783	.02	10.098	.02	9.934	.01	0.684	0.160	0.844	88
1630	4551	E2	12.85	11.033	.02	10.398	.02	10.214	.01	0.633	0.170	0.803	88
1632	4552	SO	10.78	9.323	.02	8.628	.02	8.414	.01	0.695	0.210	0.905	88
1664	4564	E6	12.02	10.163	.02	9.428	.02	9.204	.01	0.733	0.211	0.944	88
1690	4569	Sab	10.25	10.120	.01	9.397	.01	9.155	.04	0.723	0.245	0.968	87
1813	4596	SBa	11.51	10.314	.02	9.565	.02	9.382	.01	0.746	0.162	0.908	85
1834	4600	SO	13.47	12.250	.02	11.547	.02	11.345	.04	0.702	0.193	0.895	87
1903	4621	E4	10.74	9.590	.01	8.847	.01	8.635	.04	0.742	0.207	0.949	87
1938	4638	SO	12.11	10.234	.02	9.515	.02	9.312	.02	0.717	0.190	0.907	85
1939	4636	E/SO	10.48	10.100	.01	9.367	.01	9.175	.04	0.731	0.181	0.912	87
1978	4649	SO	9.81	9.214	.02	8.495	.02	8.252	.01	0.717	0.230	0.936	85
2000	4660	E3/SO	11.94	10.024	.02	9.265	.02	9.082	.01	0.757	0.170	0.927	85
2087	4733	SBO/a	12.63	12.044	.02	11.345	.02	11.162	.02	0.698	0.172	0.870	85
2092	4754	SBO	11.51	9.994	.02	9.295	.02	9.072	.01	0.697	0.207	0.904	85
2095	4762	SO	11.18	10.244	.02	9.485	.02	9.332	.01	0.757	0.142	0.899	85

Curiosamente, a pesar de ser el cúmulo de Virgo el más cercano de los cúmulos de galaxias que nos rodean no ha sido estudiado con la completez que podría esperarse. En efecto, la cercanía de este cúmulo hace el estudio de sus miembros un trabajo muy laborioso puesto que dada la extensión angular de este grupo, se requiere de telescopios de gran campo para realizar estudios de fotometría fotográfica de manera eficiente.. Las galaxias se encuentran muy alejadas unas de otras en el cielo y por lo tanto las distancias angulares entre una y otra las hace difíciles de observar. Recientemente, este problema ha sido superado en el visible puesto que Binggeli et al. (1985), en el extenso mapeo fotográfico del Observatorio de Las Campanas, han logrado obtener magnitudes en la banda azul, B_T , diámetros, velocidades de recesión y criterios de membrecía de 2096 galaxias en el cúmulo de Virgo.

Por lo que respecta al cercano IR, nuestro estudio reportado en este trabajo (Recillas-Cruz, Carrasco y Serrano, 1987) cubre la fotometría en J, H y K de 57 de estas galaxias de Binggeli et al. (1985), con el sistema IR con el que se cuenta en el OAN. En particular, el telescopio de 2 m., ha sido programado por nosotros para hacerlo viajar diferencialmente dentro del cúmulo a grandes distancias angulares sin que el guiado y el apuntamiento del telescopio pierdan precisión. Y como hicimos ver en las mediciones del cúmulo de Coma, (Capítulo IV), nuestras determinaciones fotométricas en el cercano IR son muy precisas, y se demostrará que para Virgo hemos logrado también obtener una

excelente base de datos fotométricos.

Las correcciones K, por la velocidad de recesión, para cada magnitud, se obtuvieron tomando las velocidades de recesión individuales (Binggeli et al. 1985) y calculando para cada galaxia su corrección con z para las bandas J, H y K como funciones lineales de z (Persson et al. 1979 y sección IV.2 b) del Capítulo IV). Esto se hizo así ya que a diferencia del caso de Coma, Virgo es un cúmulo como ya mencionamos, muy cercano y por lo tanto sus diferencias en distancia entre una galaxia y otra, aún dentro del cúmulo, pueden ser significativas.

Las correcciones por enrojecimiento estimadas resultaron muy pequeñas (≈ 0.01). Virgo está situado en la región cercana al polo galáctico lo cual, al igual que en el caso del cúmulo de Coma, no hace necesarias las correcciones por la extinción galáctica.

V.3 DIAGRAMAS COLOR-COLOR PARA LAS GALAXIAS DE VIRGO.

En la Figura V.1 se han graficado los valores de los colores (J-H) versus (H-K) corregidos para las galaxias del cúmulo de Virgo. Los valores promedio de (J-H) y (H-K) para 17 galaxias elípticas son 0.70 ± 0.04 y 0.20 ± 0.04 respectivamente, mientras que para 25 galaxias SO se obtiene 0.71 ± 0.04 y 0.20 ± 0.05 . Si bien la muestra es más pequeña en Virgo que en Coma, nuevamente se ve la regularidad de los diagramas color-color tanto para las galaxias elípticas como para las SO del cúmulo de Virgo, que no es más que una indicación de la población estelar que domina la

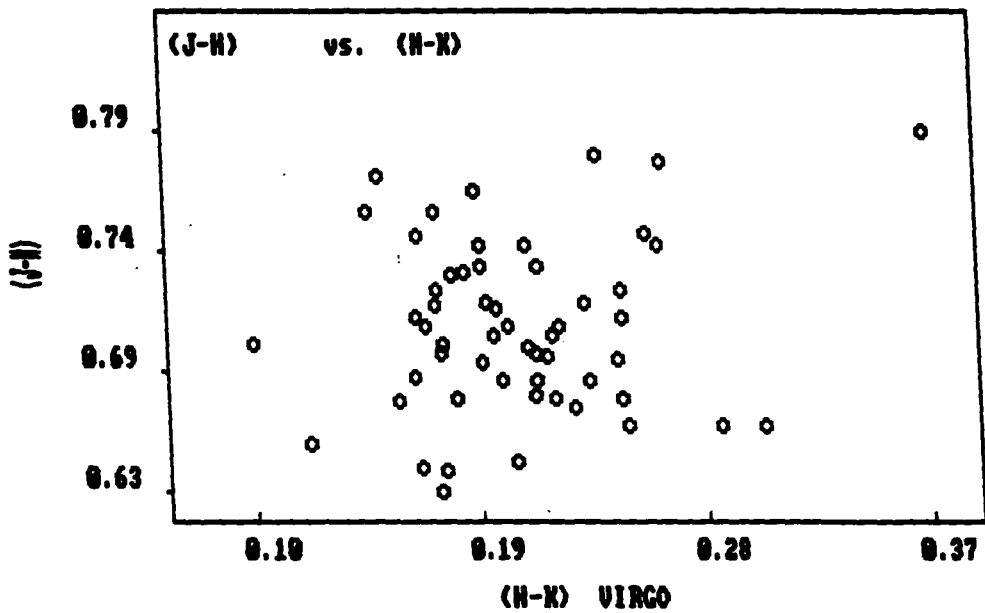


Figura V.1

luz de las galaxias elípticas: las gigantes rojas.

V.4 RELACIONES FUNDAMENTALES EN EL CÚMULO DE VIRGO

a) La estructura y la densidad ambiental en Virgo

La estructura del cúmulo de Virgo es sumamente compleja. Consiste de varias nubes de galaxias cuyas propiedades estructurales y dinámicas son diferentes (Tanaka 1985, Binggeli Tammann y Sandage 1987). Ha sido clasificado como un cúmulo irregular en contraste con Coma (Abell 1975) que siendo un cúmulo muy regular, posiblemente esté más evolucionado y relajado desde un punto de vista dinámico que Virgo.

La cercanía de las galaxias de Virgo cuyo módulo de distancia ha sido estimado por Binggeli et al. (1987) como $(m-M) = 31.70$, permite estudiar galaxias mucho más débiles que en Coma. Es así como se han descubierto un gran número de galaxias enanas, dE, (seguramente presentes también en la población de galaxias en Coma y que son muy débiles para ser observadas) cuya morfología y distribución en las diferentes regiones del cúmulo es probablemente consecuencia de la formación de galaxias más masivas en el resto del cúmulo.

Por otro lado, el tipo morfológico de galaxias que predomina en Virgo son las galaxias S0 y espirales, población galáctica que contrasta con la población en Coma. Esto se debe a la relación entre la densidad y morfología discutida por Dressler (1980). Virgo es un cúmulo menos denso que Coma. Estudios de la densidad

ambiental (Pimentel 1987, Binggeli et al. 1987) de éste cúmulo, demuestran que el número de galaxias por grado cuadrado, es menor que la densidad encontrada en Coma. En el presente trabajo hemos observado sin embargo, una mayor proporción de galaxias elípticas y SO buscando complementar los datos fotométricos en el cercano IR para estas galaxias de Virgo.

La estructura general de Virgo en las regiones de las nubes que se concentran alrededor de las galaxias M87 y M49, Nube A y Nube B; se muestra en la Figura V.2 tomada de Binggeli et al. (1987) y claramente ilustra la distribución a) de las galaxias y b) los contornos de igual densidad luminosa, del catálogo VCC de Binggeli et al. (1985).

La Figura V.3 muestra a su vez, la distribución del número de galaxias elípticas, E, SO y espirales, S, versus la densidad ambiental proyectada: número de galaxias por grado cuadrado, para las galaxias más brillantes que la magnitud $B_7 < 14$. Como se aprecia en esta gráfica, la relación entre la morfología de galaxias y la densidad ambiental implica una mayor abundancia de galaxias espirales respecto del número de galaxias esferoidales para Virgo, como es de esperarse (Dressler 1980), para un cúmulo menos denso que Coma.

Habiendo establecido que Virgo es un cúmulo de baja densidad, los parámetros que dependen de la densidad ambiental, estarán tipificados por condiciones de baja densidad.

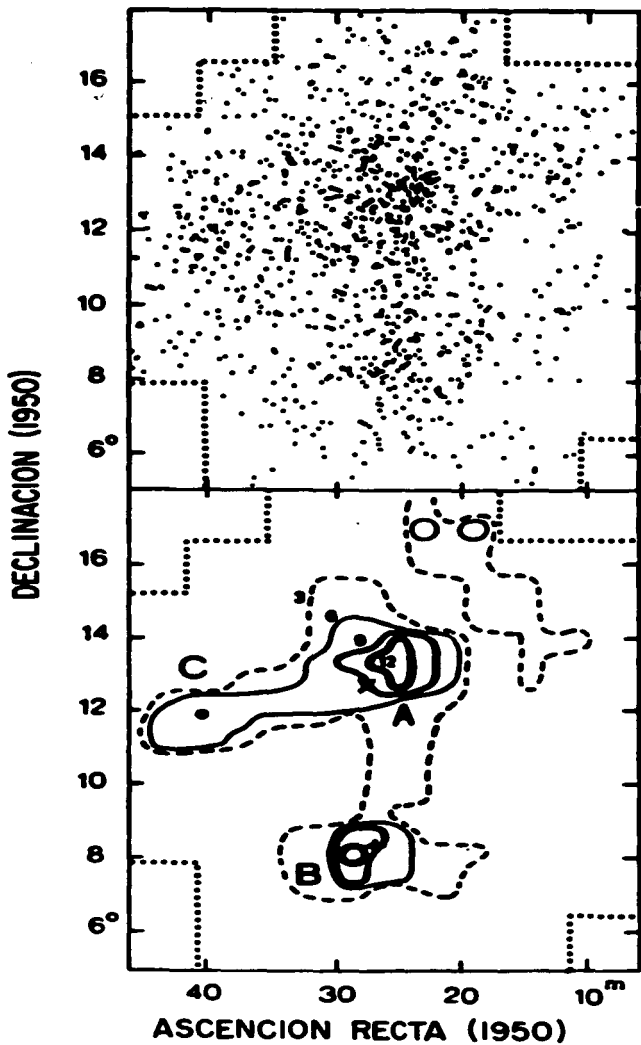


Figura V.2a

Figura V.2b

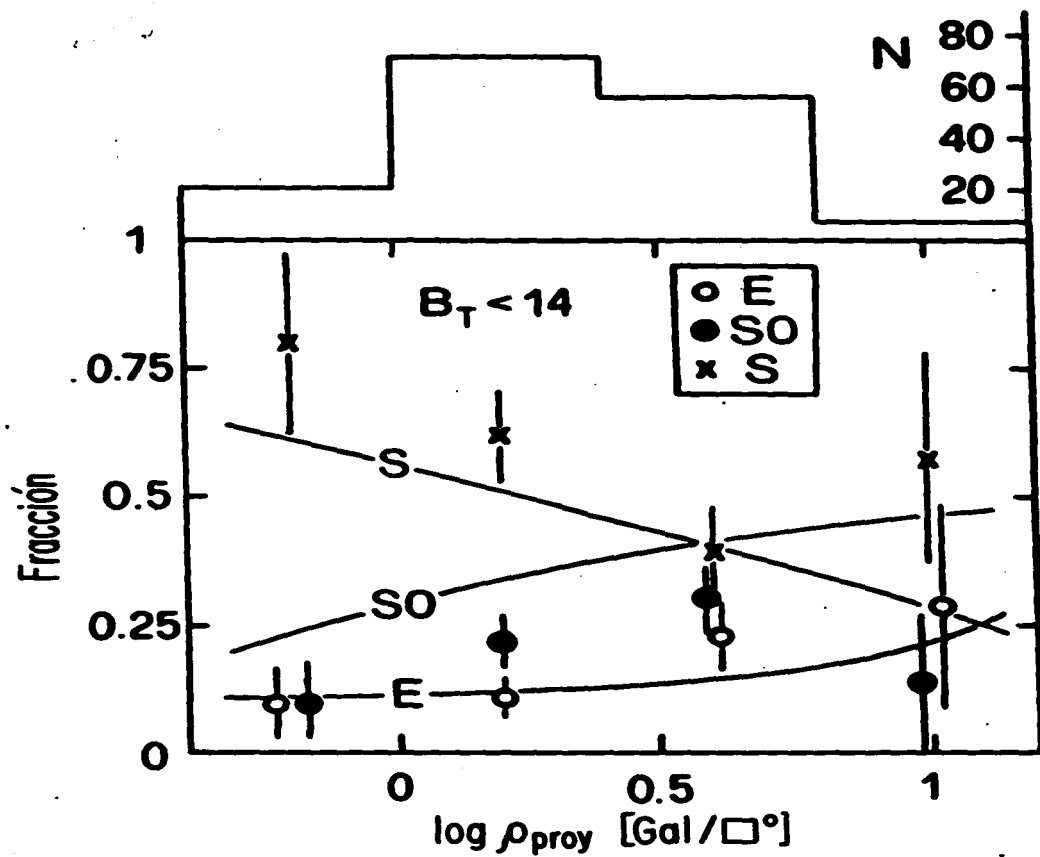


Figura V.3

B) Relación $L - \sigma$ y $L - \sigma - I_e$

La relación entre la dispersión de velocidades y la luminosidad en el azul, B_r y en el cercano infrarrojo ya discutida en Coma, también se ha establecido para las galaxias elípticas en Virgo. En la Tabla V.2 hemos listado las galaxias de la muestra que han sido utilizadas en las regresiones L versus σ y L versus σ y $\log I_e$ ($\sigma \log I_e(K)$), el brillo superficial en el azul y el corregido a partir de los colores obtenidos en el cercano IR de este estudio, de manera similar al estudio realizado con los datos presentados en el Capítulo IV para el cúmulo de Coma (Aaronsen, Persson y Frogel 1981).

Se encuentra como en el caso de Coma que la potencia de la dispersión de velocidades como función de la luminosidad en el cercano IR para dichas galaxias, en particular la relación entre $\log \sigma$ y $K_{-0.3}$, es mayor que la correspondiente a la relación en el azul. Aunque no tan contrastado como en el caso de las galaxias del cúmulo de Coma este cambio de pendiente con la longitud de onda se interpreta como producto del efecto combinado de la disminución de la temperatura efectiva de las estrellas de la rama gigante con la metalicidad, y el "Blanketing" o depresión del continuo ultravioleta y azul por absorción de líneas metálicas.

Es importante mencionar que se hicieron varias correlaciones de prueba entre $L_{K(-0.3)}$ y $\log \sigma$, excluyendo una de las galaxias de Virgo y corrigiendo una más cuyos valores de dispersión eran muy pequeños para su luminosidad. Probablemente su membresía al

TABLA V.2 Magnitudes y parámetros dinámicos estimados para galaxias E y SO del cúmulo de Virgo.

VCC	NGC	T.M.	$K_{-0.3}$	$\log \sigma$	Mg_2	$\log I_e$	$\log I_{e,r}$
49	N4168	E2	8.908	2.260	0.260	8.892	
648	N4339	SO	8.902	1.996	0.257	8.688	
657	N4342	SO	8.976	2.384	0.300	7.676	
731	N4365	E3	6.850	2.394	0.321	8.568	6.850
763	N4374	E1	6.500	2.458	0.305	8.324	6.600
828	N4387	E5	9.420	2.059	0.236	8.320	6.710
881	N4406	SO	6.510	2.398	0.311	8.660	6.980
1025	N4434	E0/SO	9.210	2.068	0.264	8.464	
1178	N4464	E3	9.490	2.083	0.241	7.696	
1226	N4472	E/SO	5.700	2.458	0.306	8.560	6.840
1231	N4473	E5	7.140	2.250	0.304	8.076	6.430
1279	N4478	E2	8.430	2.173	0.253	7.948	6.270
1316	N4486	E0	6.08	2.558	0.289	8.640	6.890
1321	N4489	SO	7.936	1.690	0.198	8.896	
1630	N4551	E2	9.277	2.000	0.264	8.380	
1632	N4552	SO	6.900	2.417	0.324	8.088	6.360
1664	N4564	E6	8.089	2.185	0.321	8.256	
1903	N4621	E4	6.860	2.380	0.328	8.392	6.660
1939	N4636	E1/SO	6.990	2.281	0.311	8.892	7.110
1978	N4649	SO	6.015	2.533	0.338	8.440	
2000	N4660	E3/SO	7.970	2.297	0.297	7.888	6.240

cúmulo sea dudosa. Creemos que nuestros resultados y las correlaciones promedio son confiables. Las regresiones y las relaciones finales se presentan en las Figuras V.4a y V.4b y se resumen en la Tabla V.3).

Pero una diferencia muy importante es que la potencia de la dispersión de velocidades en la muestra de Virgo no solo para la relación Faber-Jackson, $L-\sigma$, sino también para la regresión múltiple $L-\sigma-I_e$ en B_r y $K_{-0.3}$ (Tabla V.4), es más baja tanto en el azul como en el infrarrojo, lo cual es posible interpretar en el sentido de que la relación virial para el cúmulo de Virgo debe ser modificada incorporando un factor mayor con respecto a Coma de energía rotacional, que es el único otro sustento de la estructura dinámica. Esta tendencia se ilustra en las Figuras V.5a y V.5b en donde hemos graficado conjuntamente las relaciones para Coma y Virgo en el azul, B_r y en el cercano infrarrojo, K .

El resultado anterior implicaría que el momento angular específico promedio sería mayor en las galaxias elípticas de Virgo que en las de Coma. En otras palabras, habría más rotación en las galaxias de Virgo que en las de Coma. Una manera de probar esta hipótesis consistiría en observar velocidades de rotación en las galaxias de Virgo observadas en esta muestra; los datos existentes sobre dichas galaxias son muy escasos y se podrían obtener en un futuro usando un detector bidimensional (CCD o MEPSICRON) en el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir, B.C.

Esto nos sugiere una posible interpretación adicional de

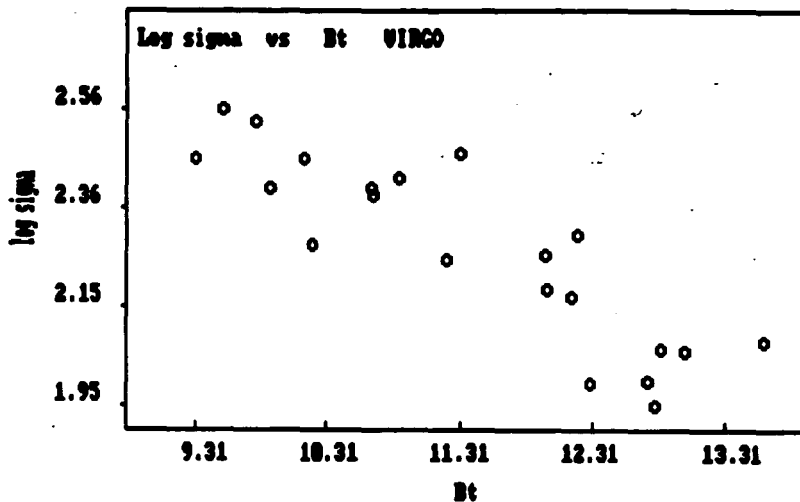


Figura V.4a

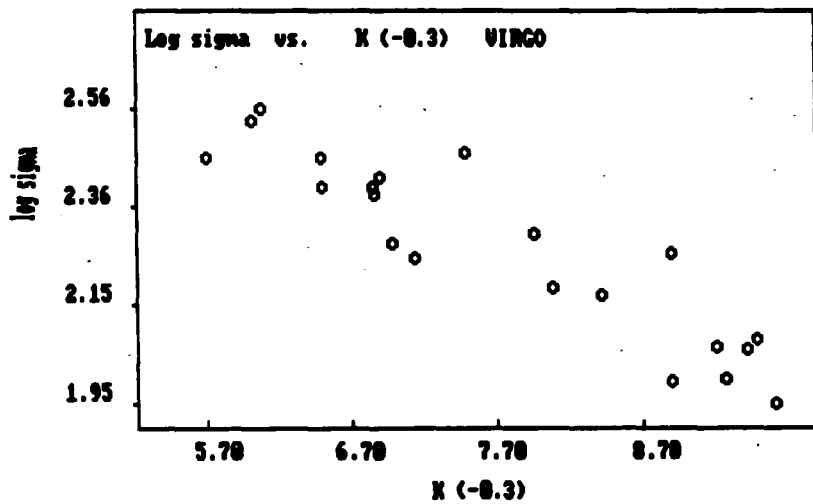


Figura V.4b

TABLA V. 3 Relaciones luminosidad versus $\log \sigma$ en el cercano IR para galaxias E y SO del cúmulo de Virgo

B₇:

20 galaxias

$$\alpha = 2.89 \pm 0.35$$

$$L_B \propto \sigma^{2.89}$$

$$(r^2 = 0.762)$$

K_{-0.3}:

20 galaxias

$$\alpha = 2.90 \pm 0.34$$

$$L_{K-0.3} \propto \sigma^{2.90}$$

$$(r^2 = 0.810)$$

TABLA V.4. Relaciones luminosidad versus $\log \sigma$ y I_e en el azul y el cercano IR para galaxias E y S0 en el cumulo de Virgo.

B₇:

20 galaxias

$$\alpha = 2.62 \pm 0.30$$

$$\beta = 0.41 \pm 0.17$$

$$(r^2 = 0.821)$$

$$L_B \propto \sigma^{2.62} I_e^{-0.41}$$

K_{-0.3}:

20 galaxias

$$\alpha = 2.84 \pm 0.40$$

$$\beta = 0.19 \pm 0.20$$

$$(r^2 = 0.822)$$

$$L_{K^*} \propto \sigma^{2.84} I_e^{-0.19}$$

K_{-0.3}:

20 galaxias

$$\alpha = 2.94 \pm 0.39$$

$$\beta = 0.23 \pm 0.19$$

$$(r^2 = 0.814)$$

$$L_{-0.3} \propto \sigma^{2.94} I_e^{-0.23}$$

* L_K estimada con I_e en el azul (Burstein et al. 1987).

orden general:

ESTA TEXTA NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Probablemente esta diferencia en rotación entre las galaxias de Coma y Virgo, se deba a las condiciones que prevalecían en las etapas protogalácticas. Es muy posible que la baja densidad ambiental en el cúmulo de Virgo, tuvo como consecuencia una baja densidad de torque y por lo tanto una remoción menos eficiente de momento angular específico inicial (Carrasco, Roth y Serrano 1982, Carrasco y Serrano 1985).

El alto momento angular promedio del cúmulo de Virgo también es puesto en evidencia por su población más rica en galaxias espirales, como se discutió arriba, (Dressler 1980, Binggeli et al. 1987) que en el cúmulo de Coma, más denso y más rico en galaxias elípticas (al menos en sus regiones centrales).

En el pasado se ha supuesto que la relación $L-\sigma$ al igual que la relación $L-\sigma - I_0$, ha sido la misma en diferentes cúmulos i.e. "relación universal"; (Dressler et al. 1987) en sus estudios de galaxias elípticas, al asumir que la relación $L-\sigma$ ($L-\sigma - I_0$) es la misma para todos los cúmulos independientemente de sus características ambientales, han borrado la información fundamental que aquí se ha descrito.

A partir de la diferencia en luminosidad entre las pendiente de las regresiones de los cúmulos de Virgo y Coma que se muestra en las Figuras V.5a para el azul y V.5b para K, hemos estimado la diferencia en magnitud Δm que es de hecho, la distancia relativa entre ambos cúmulos.

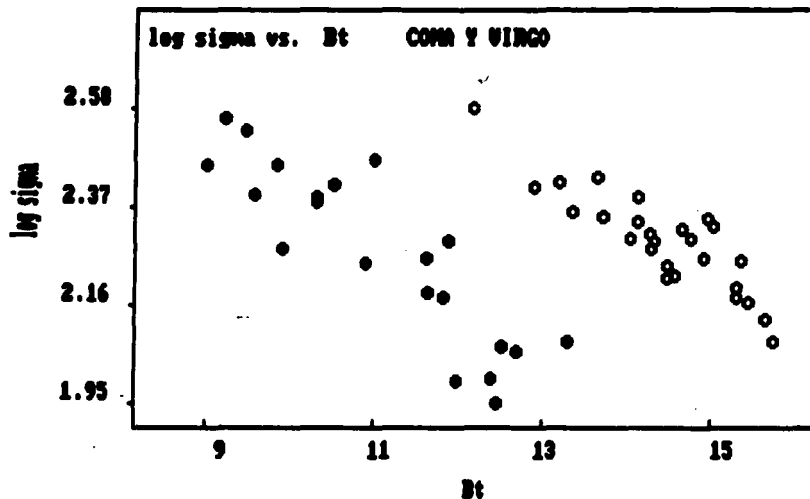


Figura V.5a

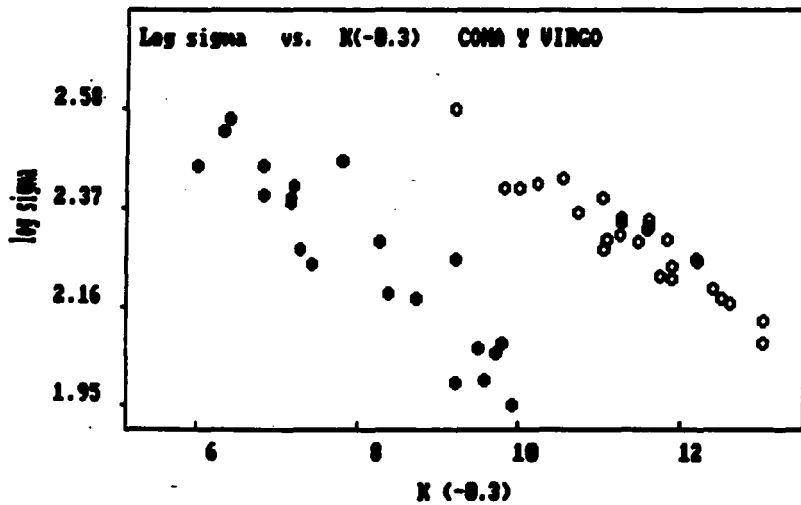


Figura V.5b

Para nuestros datos en el cercano IR, $\Delta M (K)$ tiene valores: $2.86 \leq \Delta M (K) \leq 4.29$ y adoptaremos $\langle \Delta M \rangle = 3.58$ con una incertidumbre de 0.71 magnitudes. En el azul utilizando los datos de Burstein et al. (1987) $\Delta M (B_7)$ resulta $2.78 \leq \Delta M (B_7) \leq 4.14$ con $\langle \Delta M \rangle = 3.46$ con una incertidumbre de 0.68 puesto que como se vió arriba, las pendientes no son las mismas entre uno y otro cúmulo. Las distancias relativas, ΔM entre Coma y Virgo estimadas por otros autores son, $\Delta M = 3.5, 3.0$ y 2.6 a partir de los colores $(u - V)$, $(u - K)$ y $(V - K)$ respectivamente (Aaronson et al. 1981); y $\Delta M = 3.75$ de la relación Faber-Jackson: $\log \sigma$ vs. V_{25} y $\Delta M = 4.00$ de la relación Mg_2 versus V_{25} en Dressler (1984). De manera que la diferencia de magnitud relativa estimada de nuestros datos en el cercano IR para Coma y Virgo es similar dentro de la incertidumbre, a los valores encontrados en otros estudios.

Por otro lado, hemos encontrado un efecto adicional que es posiblemente muy marginal, respecto al comportamiento del brillo superficial y su relación con la dispersión de velocidades y que presentamos en la Tabla V.4. Se aprecia que si bien la correlación entre ambos parámetros es prácticamente nula; hay una tendencia de la correlación en el cercano IR ($K_{0.3}$) a ser mejor que en el azul (B_7) y, lo que parecería ser más significativo, la correlación encontrada en Coma tanto en el azul como en el cercano infrarrojo, es mejor que la correlación respectiva para las galaxias en el cúmulo de Virgo.

c) Relación M/L en Coma y Virgo

De las relaciones obtenidas para la luminosidad, dispersión de velocidades y brillo superficial para Virgo presentadas en la Tabla V.4, obtenemos las siguientes correlaciones entre el cociente M/L para la banda azul y en el cercano IR como función de la luminosidad y el brillo superficial:

$$M/L_B \propto L^{0.25} I_{e(B)}^{-0.19} \quad V.1$$

$$M/L_K \propto L^{0.18} I_{e(K)}^{-0.34} \quad V.2$$

Recordando las expresiones de las mismas dependencias para el cúmulo de Coma, i.e., en el azul, $M/L_B \propto L^{0.25} I_{e(B)}^{-0.2}$ y en el cercano IR, $M/L_{IR} \propto L^{0.04} I_{e(K)}^{-0.40}$; es evidente que la relación M/L en el IR que revela la distribución de la masa de manera más significativa que en el azul, parece depender de la luminosidad en el caso del cúmulo de Virgo. En el caso de Coma el cociente M/L era independiente de la luminosidad, no así del brillo superficial, tendencia que también se observa en Virgo.

El hecho de que la relación M/L derivada en el cercano IR, retenga una dependencia en la luminosidad, puede deberse a lo siguiente: Puesto que en nuestra derivación teórica de M/L se asumió que $L \propto \sigma^4$, se está implicando que los sistemas esferoidales están soportados por los movimientos estelares aleatorios, i.e. dispersión de velocidades. Probablemente, no siendo éste el caso para las galaxias miembros del cúmulo de Virgo, esto nos puede inducir a una relación M/L espuria, ya que es posible argumentar que la relación $L \propto \sigma$ en Virgo es más cercana

a σ^3 que a σ^4 , puesto que estamos encontrando una pendiente más pequeña en las relaciones $L-\sigma-I_g$.

Por otro lado, en las galaxias elípticas del cúmulo de Coma estamos encontrando una solución que parece muy cercana a σ^4 , es decir, mientras mejor se comporta el sistema como $L \propto \sigma^4$, el cociente M/L en el cercano IR no depende de L . Consecuentemente, una dependencia del cociente M/L con L o con la masa, sugieren un efecto de metalicidad en el azul que simula una dependencia $M/L \propto L^2$ que no es real.

d) El índice Mg_2 versus la luminosidad en Virgo.

En las Figuras V.6a y V.6b se presentan las relaciones entre la luminosidad de galaxias elípticas y SO del cúmulo de Virgo observadas en este estudio, tanto en la banda azul, B_r como en el cercano IR, $K_{0.3}$ y el índice de metalicidad Mg_2 .

Como es de esperarse, las correlaciones sugieren que las galaxias más luminosas en Virgo, son también las que presentan índices de metalicidad Mg_2 mayores. Sin embargo, no se conoce bien el comportamiento del índice Mg_2 con la metalicidad y si bien el índice Mg_2 aumenta con la metalicidad, la rama gigante también se vuelve más roja para metalicidades mayores y Mg_2 aumenta fuertemente con la disminución de la temperatura. Con esto, no es claro que el cambio de Mg_2 sea una indicación de más metalicidad, gravedad o bien efectos de temperatura efectiva.

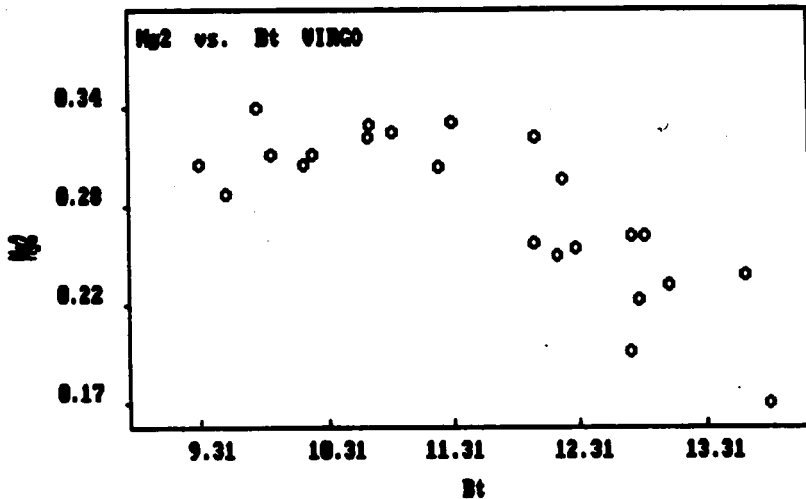


Figura V.6a

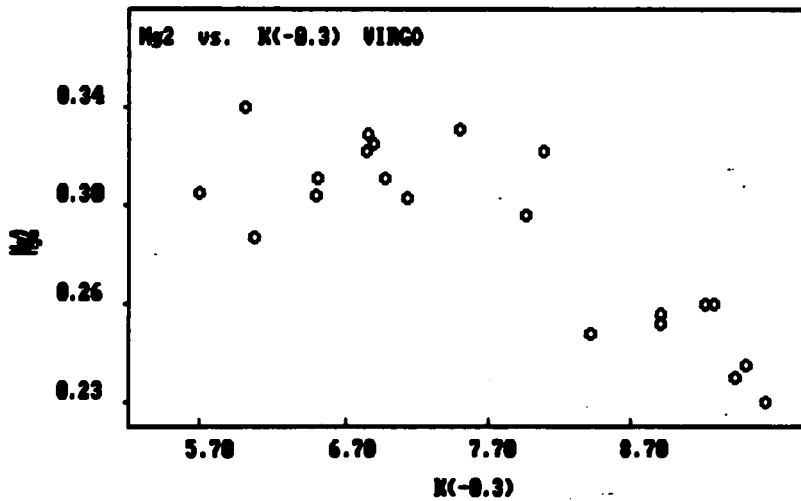


Figura V.6b

CAPITULO V

REFERENCIAS

- Aaronson, M. Persson, S.E. y Frogel, J.A. 1981, *Astrophys. J.*, 245, 18.
- Abell, G. 1975, en *Galaxies and the Universe, Stars and Stellar Systems*, 9, A. Sandage, M. Sandage y J. Kristian (eds.), University of Chicago Press, 601.
- Binggeli, B., Tammann, G.A. y Sandage, A. 1985, *Astron. J.*, 90, 1681.
- Binggeli, B., Tammann, G.A. y Sandage, A. 1987, *Astron. J.*,
- Carrasco, L., Roth, M. y Serrano, A. 1982, *Astron. Astrophys.*, 106, 89.
- Carrasco, L. y Serrano, A. 1985, *Intern. J. Fus. Ener.*, 3, 57.
- Dressler, A. 1980, *Astrophys. J.*, 236, 351.
- Dressler, A. 1984, *Astrophys. J.*, 281, 512.
- Dressler, A., Lynden-Bell, D., Burstein, D., Davies, R.L., Faber, S.M., Terlevich, R.J. y Wegner, G. 1987, *Astrophys. J.*, 313, 42.
- Persson, S.E., Frogel, J.A. y Aaronson, M. 1979, *Astrophys. J. Suppl.*, 39, 61.
- Pimentel, P. 1987, Tesis Profesional, en preparación.
- Recillas-Cruz, E., Carrasco, L. y Serrano, A. 1987, en preparación
- Tanaka, K.I. 1985, *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 37, 427.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

Las conclusiones al trabajo de tesis presentado aquí, se resumirán estableciendo los puntos principales que son los siguientes:

1. La densidad ambiental de galaxias es un factor esencial en la determinación de las propiedades y relaciones entre parámetros estructurales de las galaxias elípticas en cúmulos de galaxias.
2. Hemos encontrado una relación fundamental para galaxias elípticas entre el radio, luminosidad, brillo superficial y densidad superficial local de galaxias de la forma

$$r_e \approx 10.448 I_e^{-0.413} \rho_{\text{prev}}^{-0.14}$$

Una relación de éste tipo, implica que, 1) no existe un perfil universal de luminosidad para galaxias elípticas, y 11) hay un efecto ambiental de densidad, tal que los radios efectivos de una galaxia con una luminosidad y brillo superficiales dados, varían como $\rho_{\text{prev}}^{-0.14}$.

3. Se encuentra una variación sistemática de la distribución de

brillos superficiales con la densidad local de galaxias. A mayor densidad ambiental, mayor es el número de galaxias de alto brillo superficial asociadas. El brillo superficial contribuye adicionalmente a la dependencia del radio de las condiciones ambientales. Por otro lado, se espera que en las regiones de alta densidad, los radios de las galaxias sean menores cuando se consideran galaxias fusionantes, "mergers" y colisiones entre galaxias. Sin embargo, la variación observada en el radio, parece ser mucho mayor de lo que el modelaje de galaxias fusionantes predice.

4. Se ha encontrado una dependencia de la dispersión de velocidades con la luminosidad y el brillo superficial que es función de la longitud de onda en la cual se determinan las luminosidades. Para el cercano infrarrojo, la dependencia es más pronunciada que en el caso de las bandas azul y visual.
5. La relación M/L en el cercano infrarrojo, M/L_{IR} no depende de la luminosidad total L_{IR} de la galaxia. La dependencia inversa de M/L con el brillo superficial I_0 , es mayor en el cercano IR que para las luminosidades determinadas en el azul o visual.
6. Del análisis de las relaciones M/L obtenidas, se establece que la formación de galaxias elípticas normales no pudo haber ocurrido a través de un mecanismo de "mergers" o fusión de otras galaxias.
7. Con los datos de la fotometría en el cercano infrarrojo

presentados aquí, hemos determinado la distancia relativa entre el cúmulo de Virgo y el de Coma, que es: $\Delta m (K) = 3.58$.

8. Al establecer las relaciones dinámicas entre la luminosidad total en el cercano infrarrojo, la dispersión de velocidades y el brillo superficial de las galaxias en el cúmulo de Virgo comparativamente al cúmulo de Coma, se encuentra que existen diferencias en el grado de soporte dinámico de las galaxias en Virgo. Es decir, las galaxias elípticas en Virgo están más soportadas por rotación.
9. La rotación en galaxias esferoidales tiende a modificar la relación $L \propto \sigma^n$, haciendo n más cercana a 4. El hecho de obtener relaciones entre $L-\sigma-I$, con σ^{2-3} , sugiere que los cocientes M/L que dependen de L , son espurios debido precisamente, a que parte del soporte de galaxias esferoidales es por rotación, efecto que simula un incremento de M/L con L .