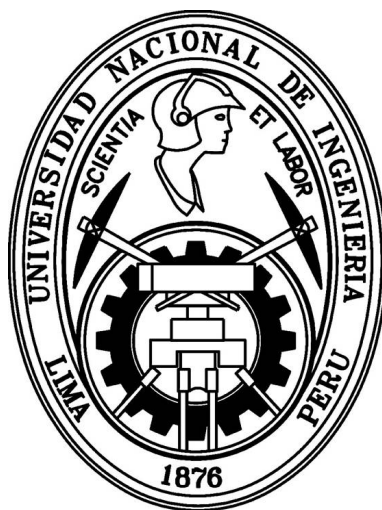


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**



TESIS

**”BÚSQUEDA DE ESTRELLAS BINARIAS ECLIPSANTES EN  
DIRECCIÓN AL BULBO DE LA GALAXIA CON DATOS DE LOS  
CATÁLOGOS OGLE II Y MACHO”**

PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN  
FÍSICA

ELABORADO POR:

**ESTEFANY ALMENDRA URDAY ESCOBAR**

ASESOR:

**DR. JULIO TELLO GALVEZ**

LIMA-PERÚ

2018

*A mis padres,  
por ser el pilar fundamental  
en todo lo que soy.*

# AGRADECIMIENTOS

Con este trabajo, quiero expresar un profundo agradecimiento a quienes con su ayuda, apoyo y comprensión me alentaron a lograr este proyecto.

Agradezco en primer lugar al Programa de Becas de Maestría de CONCYTEC y CIENCIACTIVA, por el apoyo económico que hizo posible la realización de este trabajo de investigación y a la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), en cuyas instalaciones se llevaron a cabo las presentaciones, exposiciones y otras difusiones de los avances del trabajo que se iba desarrollando.

Expreso mi sincero agradecimiento a mi asesor de tesis, el Dr. Julio Tello Gálvez, por su dedicación y apoyo académico me ha ido orientado en mi labor científica. Su confianza, paciencia y motivación son invaluable y han hecho posible la culminación de este trabajo.

Doy gracias a todos aquellos que fueron mis profesores durante el dictado de cursos y todos aquellos quienes directa o indirectamente me han ayudado durante todo este tiempo.

Un inmenso agradecimiento a mi familia, en especial a mis padres, por brindarme su aliento, confianza y comprensión, y a mis hermanos por haber fomentado en mi el deseo de superación.

Finalmente un especial agradecimiento a mis compañeros, por el agradable ambiente de ánimo y apoyo entre nosotros, con el objetivo común de avanzar y concluir nuestro trabajos.

# RESUMEN

El presente trabajo se focaliza en usar los datos de estrellas variables del catálogo OGLE II con la finalidad de separar de ellas un tipo de estrellas variables: Las estrellas binarias eclipsantes. Este tipo de estrellas es un sistema de 2 estrellas unidas gravitacionalmente y cuyo plano orbital está a lo largo de la línea visual del observador. Debido a esta configuración, en cada ciclo orbital, se producen 2 eclipses: primero cuando una de las componentes se interpone entre el observador y la segunda estrella; y luego, en otro momento de la órbita, cuando la segunda componente eclipsa a la primera.

La importancia de estudiar este tipo de objetos se basa en que las propiedades físicas de una estrella simple (radio, temperatura, masa) se obtienen a partir del estudio de sistemas binarios eclipsantes. Como resultado de medir la variación del flujo luminoso de estos objetos se obtiene lo que se denomina la curva de luz de una estrella variable. En el caso de un sistema binario eclipsante, cuanto más curvas de luz sean medidas en diferentes filtros, más parámetros del sistema podrán ser determinados.

En este trabajo, además de identificar las binarias eclipsantes del catálogo OGLE II, buscaremos sus contrapartidas en otro catálogo llamado MACHO, esto significa obtener las mismas binarias que estén contenidas simultáneamente en ambos catálogos. Con los resultados obtenidos, esperamos generar nuestro propio catálogo de binarias eclipsantes con información fotométrica en tres filtros I, V y R. Del nuevo catálogo de binarias eclipsantes se pueden elegir un conjunto de sistemas estelares con características especiales y que pueden ser objetos para analizar en proyectos de investigación futuros.

Palabras claves: OGLE II, MACHO, Estrellas Binarias Eclipsantes.

# ABSTRACT

The present work focuses on using the data of variable stars of the OGLE II catalog with the purpose of separating from them a type of variable stars: The eclipsing binary stars. This type of stars is a system of 2 stars gravitationally linked and whose orbital plane is along the line of sight of the observer. Due to this configuration, in each orbital cycle, 2 eclipses are produced: first when one of the components is interposed between the observer and the second star; and then, in another moment of the orbit, when the second component eclipses the first one.

The importance of studying this type of objects is based on the fact that the physical properties of a simple star (radius, temperature, mass) are obtained from the study of eclipsing binary systems. As a result of measuring the luminous flux variation of these objects, what is called the light curve of a variable star is obtained. In the case of an eclipsing binary system, the more light curves are measured in different filters, the more system parameters can be determined. In this work, in addition to identifying the eclipsing binaries of the OGLE II catalog, we will look for their counterparts in another catalog called MACHO, this means obtaining the same binaries that are simultaneously contained in both catalogs. With the results obtained, we hope to generate our own catalog of eclipsing binaries with photometric information in three filters I, V and R. From the new catalog of eclipsing binaries you can choose a set of star systems with special characteristics that can be objects to be analyzed in future research projects.

Keywords: OGLE II, MACHO, Eclipsantes Binary Stars.

# Índice general

Agradecimientos	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
Lista de figuras	VII
Lista de tablas	XV
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA . . . . .	1
1.2. HIPÓTESIS . . . . .	4
1.3. JUSTIFICACIÓN . . . . .	4
1.4. OBJETIVOS . . . . .	5
1.4.1. OBJETIVO GENERAL . . . . .	5
1.4.2. OBJETIVO ESPECÍFICO . . . . .	5
<b>2. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>6</b>
2.1. ANTECEDENTES . . . . .	6
2.2. ESTRELLAS VARIABLES . . . . .	9
2.3. FECHA JULIANA . . . . .	11
2.4. RESEÑA HISTÓRICA . . . . .	12
2.5. CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRELLAS VARIABLES . . . . .	17
2.5.1. VARIABLES INTRÍNSECAS . . . . .	18
2.5.2. VARIABLES EXTRÍNSECAS . . . . .	22
2.6. ESTRELLAS BINARIAS . . . . .	23

2.6.1. TIPOS DE ESTRELLAS BINARIAS . . . . .	25
2.6.2. BINARIAS FOTOMÉTRICAS . . . . .	30
<b>3. FUENTES DE DATOS UTILIZADOS</b>	<b>37</b>
3.1. OGLE . . . . .	37
3.2. MACHO . . . . .	38
<b>4. METODOLOGÍA</b>	<b>39</b>
4.1. EXAMEN DE CAMPOS . . . . .	40
4.2. CÁLCULO DE PERIODO Y SELECCIÓN DE ECLIPSANTES . . . . .	42
4.3. BÚSQUEDA DE POSIBLES CONTRAPARTIDAS . . . . .	47
4.4. IDENTIFICACIÓN DE LA CONTRAPARTIDA MACHO . . . . .	50
4.5. CONVERSIÓN DE LAS MAGNITUDES INSTRUMENTALES A ESTÁNDAR	52
<b>5. RESULTADOS</b>	<b>54</b>
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>64</b>
<b>Apéndice A</b>	<b>66</b>
<b>Apéndice B</b>	<b>72</b>
<b>Apéndice C</b>	<b>74</b>
<b>Apéndice D</b>	<b>77</b>
<b>Apéndice E</b>	<b>81</b>

# Índice de figuras

1.1. Región del bulbo de nuestra Galaxia observada por OGLE-II y dividida en 49 campos. . . . .	2
1.2. Distribución de los 94 campos MACHO [2] en la dirección del bulbo de la Galaxia. . . . .	3
2.1. Representación de una curva de luz de una estrella variable [21]. . . . .	10
2.2. Ubicación de los principales tipos de variables en el diagrama HR. . . . .	17
2.3. En esta figura se observa una relación lineal entre la magnitud visual absoluta y el logaritmo del periodo expresado en días. Sin embargo la ecuación varia según la galaxia donde se encuentran las Cefeidas [28]. . . . .	19
2.4. Curva de luz para la R Coronae Borealis [?]. . . . .	21
2.5. Curva de luz de una Supernova, mostrando un descenso en el brillo de 12 magnitud en 800 días [24]. . . . .	22
2.6. Curva de luz de una binaria eclipsante [13]. . . . .	23
2.7. Curva de luz de estrella Algol[16]. Véase la gran diferencia de profundidad en los eclipses estelares en fase 0 y fase 0.5 aproximadamente. Fuera de los eclipses la magnitud es casi constante. . . . .	34
2.8. Curva de luz de la estrella $\beta$ Lyrae[42]. Nótese que la magnitud varia en todo momento, incluso fuera de los eclipses. . . . .	35
2.9. Curva de luz de la estrella W Ursae Majoris en magnitud ( $\Delta B$ y $\Delta V$ ) . . . . .	36
4.1. Esquema que describe los pasos a seguir para obtener la contrapartida MACHO de una estrella binaria OGLE. . . . .	40
4.2. Intersección de los centros de los campos BUL-SC10 de OGLE y 309 de MACHO. . . . .	41



4.3.	Curva de luz de la binaria eclipsante OGLE BUL-SC10-1823. . . . .	43
4.4.	Curva de luz de la binaria eclipsante OGLE BUL-SC10-1847. . . . .	44
4.5.	Curva de luz de la pulsante OGLE BUL-SC10-112. . . . .	45
4.6.	Curva de luz de la pulsante OGLE BUL-SC10-1062. . . . .	45
4.7.	Curva de luz de un probable microlente. . . . .	46
4.8.	Curva de luz de una estrella variable no definida. . . . .	47
4.9.	Distribución de los campos del catálogo MACHO. . . . .	49
4.10.	Distribución de los TILES del catálogo MACHO que contienen los campos de ese catálogo. En este ejemplo se presentan los tiles T1, T2 hasta T28. Los campos 108, 109 y 113 están contenidos en más de un tile. . .	49
4.11.	Curva de luz OGLE BUL-SC45-1218 con periodo 0.1.06538d. . . . .	51
4.12.	Curva de luz del objeto MACHO 119-20091-4165 en filtro r. . . . .	51
4.13.	Curva de luz del objeto MACHO 119-20091-4165 en filtro b. . . . .	52
4.14.	Curva de luz del objeto MACHO 309-38255-747 en filtro R. . . . .	53
4.15.	Curva de luz del objeto MACHO 309-38255-747 en filtro V. . . . .	53
5.1.	Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1944 y su contrapartida MACHO 119-20095-476 en filtros I y R. . . . .	57
5.2.	Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1759 con contrapartida MACHO 119-20094-2104. . . . .	58
5.3.	Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1474 y su contrapartida MACHO 119-20093-2405. . . . .	59
5.4.	Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1064 y su contrapartida MACHO 119-20480-193. . . . .	60
5.5.	Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1591 y su contrapartida MACHO 119-20483-447. . . . .	61
5.6.	Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-640 y su contrapartida MACHO 119-20478-43. . . . .	62
5.7.	Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1899 y su contrapartida MACHO 119-20355-1029. . . . .	63
6.1.	Intersección de los campos 10,12 y 13 del catálogo OGLE II con los campos 307 y 309 de MACHO. . . . .	74

6.2. Intersección de los campos 16 y 17 del catálogo OGLE II con el campo 178 de MACHO. . . . .	75
6.3. Intersección de los campos 4 y 39 del catálogo OGLE II con el campo 403 de MACHO. . . . .	75
6.4. Intersección de los campos 18, 35, 36, 32, 31, 33, 02, 20, 34, 46, 45, 01, 38 y 39 del catálogo OGLE II con los campos 101, 105, 104, 108, 109, 114, 113, 119, 128, 402 y 403 de MACHO. . . . .	76
6.5. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-501 y su contrapartida MACHO 119-20087-3373. . . . .	81
6.6. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-516 y su contrapartida MACHO 119-20347-48. . . . .	81
6.7. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-520 y su contrapartida MACHO 119-20347-687. . . . .	81
6.8. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-532 y su contrapartida MACHO 119-20087-3355. . . . .	81
6.9. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-534 y su contrapartida MACHO 119-20087-3296. . . . .	82
6.10. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-539 y su contrapartida MACHO 119-20217-793. . . . .	82
6.11. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-575 y su contrapartida MACHO 119-20347-154. . . . .	82
6.12. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-624 y su contrapartida MACHO 119-20218-179. . . . .	82
6.13. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-627 y su contrapartida MACHO 119-20218-30. . . . .	82
6.14. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-630 y su contrapartida MACHO 119-20218-837. . . . .	82
6.15. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-640 y su contrapartida MACHO 119-20478-43. . . . .	83
6.16. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-666 y su contrapartida MACHO 119-20348-472. . . . .	83

6.17. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-673 y su contrapartida MACHO 119-20088-3317. . . . .	83
6.18. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-675 y su contrapartida MACHO 119-20088-3874. . . . .	83
6.19. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-679 y su contrapartida MACHO 119-20218-105. . . . .	83
6.20. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-701 y su contrapartida MACHO 119-20088-3318. . . . .	83
6.21. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-718 y su contrapartida MACHO 119-20348-1027. . . . .	84
6.22. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-753 y su contrapartida MACHO 119-20349-52. . . . .	84
6.23. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-776 y su contrapartida MACHO 119-20219-702. . . . .	84
6.24. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-779 y su contrapartida MACHO 119-20219-1116. . . . .	84
6.25. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-790 y su contrapartida MACHO 119-20349-1342. . . . .	84
6.26. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-803 y su contrapartida MACHO 119-20089-3962. . . . .	84
6.27. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-875 y su contrapartida MACHO 119-20219-1481. . . . .	85
6.28. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-931 y su contrapartida MACHO 119-20220-34. . . . .	85
6.29. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-934 y su contrapartida MACHO 119-20090-3977. . . . .	85
6.30. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-989 y su contrapartida MACHO 119-20350-1486. . . . .	85
6.31. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1041 y su contrapartida MACHO 119-20091-4263. . . . .	85
6.32. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1051 y su contrapartida MACHO 119-20351-54. . . . .	85

6.33. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1052 y su contrapartida MACHO 119-20351-1362. . . . .	86
6.34. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1064 y su contrapartida MACHO 119-20480-193. . . . .	86
6.35. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1111 y su contrapartida MACHO 119-20091-4191. . . . .	86
6.36. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1153 y su contrapartida MACHO 119-20221-812. . . . .	86
6.37. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1155 y su contrapartida MACHO 119-20351-1214. . . . .	86
6.38. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1209 y su contrapartida MACHO 119-20351-646. . . . .	86
6.39. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1218 y su contrapartida MACHO 119-20091-4165. . . . .	87
6.40. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1241 y su contrapartida MACHO 119-20481-690. . . . .	87
6.41. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1253 y su contrapartida MACHO 119-20092-2651. . . . .	87
6.42. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1265 y su contrapartida MACHO 119-20092-4158. . . . .	87
6.43. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1270 y su contrapartida MACHO 119-20222-2866. . . . .	87
6.44. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1303 y su contrapartida MACHO 119-20352-2332. . . . .	87
6.45. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1304 y su contrapartida MACHO 119-20352-2718. . . . .	88
6.46. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1309 y su contrapartida MACHO 119-20352-3100. . . . .	88
6.47. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1315 y su contrapartida MACHO 119-20092-999. . . . .	88
6.48. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1358 y su contrapartida MACHO 119-20092-897. . . . .	88

6.49. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1376 y su contrapartida MACHO 119-20352-310. . . . .	88
6.50. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1406 y su contrapartida MACHO 119-20223-6866. . . . .	88
6.51. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1450 y su contrapartida MACHO 119-20223-1396. . . . .	89
6.52. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1451 y su contrapartida MACHO 119-20223-1329. . . . .	89
6.53. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1464 y su contrapartida MACHO 119-20483-483. . . . .	89
6.54. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1474 y su contrapartida MACHO 119-20093-2405. . . . .	89
6.55. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1505 y su contrapartida MACHO 119-20093-3190. . . . .	89
6.56. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1506 y su contrapartida MACHO 119-20093-2405. . . . .	89
6.57. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1522 y su contrapartida MACHO 119-20353-1964. . . . .	90
6.58. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1591 y su contrapartida MACHO 119-20483-447. . . . .	90
6.59. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1597 y su contrapartida MACHO 119-20094-49. . . . .	90
6.60. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1598 y su contrapartida MACHO 119-20224-1270. . . . .	90
6.61. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1678 y su contrapartida MACHO 119-20094-2461. . . . .	90
6.62. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1681 y su contrapartida MACHO 119-20094-287. . . . .	90
6.63. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1682 y su contrapartida MACHO 119-20094-179. . . . .	91
6.64. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1689 y su contrapartida MACHO 119-20224-374. . . . .	91

6.65. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1697 y su contrapartida MACHO 119-20224-415. . . . .	91
6.66. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1753 y su contrapartida MACHO 119-20354-45. . . . .	91
6.67. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1759 y su contrapartida MACHO 119-20094-2104. . . . .	91
6.68. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1814 y su contrapartida MACHO 119-20224-748. . . . .	91
6.69. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1820 y su contrapartida MACHO 119-20355-744. . . . .	92
6.70. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1830 y su contrapartida MACHO 119-20484-308. . . . .	92
6.71. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1843 y su contrapartida MACHO 119-20225-180. . . . .	92
6.72. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1847 y su contrapartida MACHO 119-20225-625. . . . .	92
6.73. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1896 y su contrapartida MACHO 119-20225-1894. . . . .	92
6.74. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1899 y su contrapartida MACHO 119-20355-1029. . . . .	92
6.75. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1925 y su contrapartida MACHO 119-20355-583. . . . .	93
6.76. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1927 y su contrapartida MACHO 119-20485-331. . . . .	93
6.77. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1933 y su contrapartida MACHO 119-20485-299. . . . .	93
6.78. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1943 y su contrapartida MACHO 119-20095-3974. . . . .	93
6.79. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1944 y su contrapartida MACHO 119-20095-476. . . . .	93
6.80. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1970 y su contrapartida MACHO 119-20355-6233. . . . .	93

6.81. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2057 y su contrapartida MACHO 119-20356-1368. . . . .	94
6.82. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2085 y su contrapartida MACHO 119-20226-333. . . . .	94
6.83. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2086 y su contrapartida MACHO 119-20226-667. . . . .	94
6.84. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2092 y su contrapartida MACHO 119-20226-1288. . . . .	94
6.85. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2094 y su contrapartida MACHO 119-20356-1701. . . . .	94
6.86. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2099 y su contrapartida MACHO 119-20096-1563. . . . .	94
6.87. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2159 y su contrapartida MACHO 119-20356-120. . . . .	95
6.88. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2161 y su contrapartida MACHO 119-20357-10. . . . .	95
6.89. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2170 y su contrapartida MACHO 119-20357-617. . . . .	95
6.90. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2177 y su contrapartida MACHO 119-20097-1578. . . . .	95
6.91. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2193 y su contrapartida MACHO 119-20357-35. . . . .	95
6.92. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2230 y su contrapartida MACHO 119-20227-122. . . . .	95
6.93. Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2262 y su contrapartida MACHO 119-20357-778. . . . .	96

# Índice de cuadros

2.1. Resumen de los principales proyectos de observación de estrellas variables. . . . .	8
4.1. Coordenadas de los centros de los campos BUL-SC10 de OGLE y 309 de MACHO. . . . .	41
4.2. Seis posibles contrapartidas de BUL-SC45-1218 encontradas en el catálogo MACHO ordenadas según su proximidad en el cielo. . . . .	50
5.1. Resultados globales obtenidos de nuestra selección de binarias. . . . .	55
5.2. Parámetros de algunas binarias eclipsantes OGLE y su respectiva contrapartida MACHO. . . . .	56
6.1. Coordenadas de los centros de los 49 campos del catálogo OGLE II [43].	66
6.2. Coordenadas de los centros de los 94 campos del catálogo MACHO [33].	68
6.3. Centros de los campos comunes del catálogo OGLE II y MACHO. . . . .	72
6.4. Información de las binarias eclipsantes del campo 45 de OGLE II y su contrapartida MACHO 119. . . . .	77



# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En los últimos años, el número de estrellas variables conocidas en las regiones centrales de la Vía Láctea ha crecido significativamente, principalmente gracias a la publicación de una extensa colección de estrellas variables por el Experimento de Lente Gravitacional Óptico (OGLE[29], por sus siglas en inglés). Cientos de miles de estrellas pulsantes (por ejemplo, Soszyński et al (2011)[37], (2013)[38], (2014)[39]) descubiertas por OGLE han permitido un análisis exhaustivo de la teoría de pulsación estelar y de la estructura del bulbo galáctico. Los sistemas binarios eclipsantes tienen el potencial de jugar un papel igualmente importante en la exploración de las partes centrales de la Galaxia, aunque hasta ahora solo una pequeña fracción de las binarias en esta región del cielo ha sido catalogada y estudiada.

Los datos de OGLE Wozniak (2002)[43], consisten en datos de la variación de flujo luminoso de estrellas variables (que pueden ser estrellas pulsantes y sistemas binarios eclipsantes) en diferentes regiones del cielo donde hay gran densidad de estrellas como ocurre en las galaxias. El proyecto OGLE en su segunda temporada (OGLE II) estuvo registrando datos de estrellas variables en dirección del bulbo de nuestra Galaxia. Los datos de 200000 estrellas variables fueron medidos usando el filtro I. La región del cielo medida por OGLE II fue dividida en 49 campos (figura 1.1) y sus resultados están contenidos en un catálogo con información de cada campo del cielo, posición de las estrellas en ese campo, tiempo de observación y variación en magnitud I.

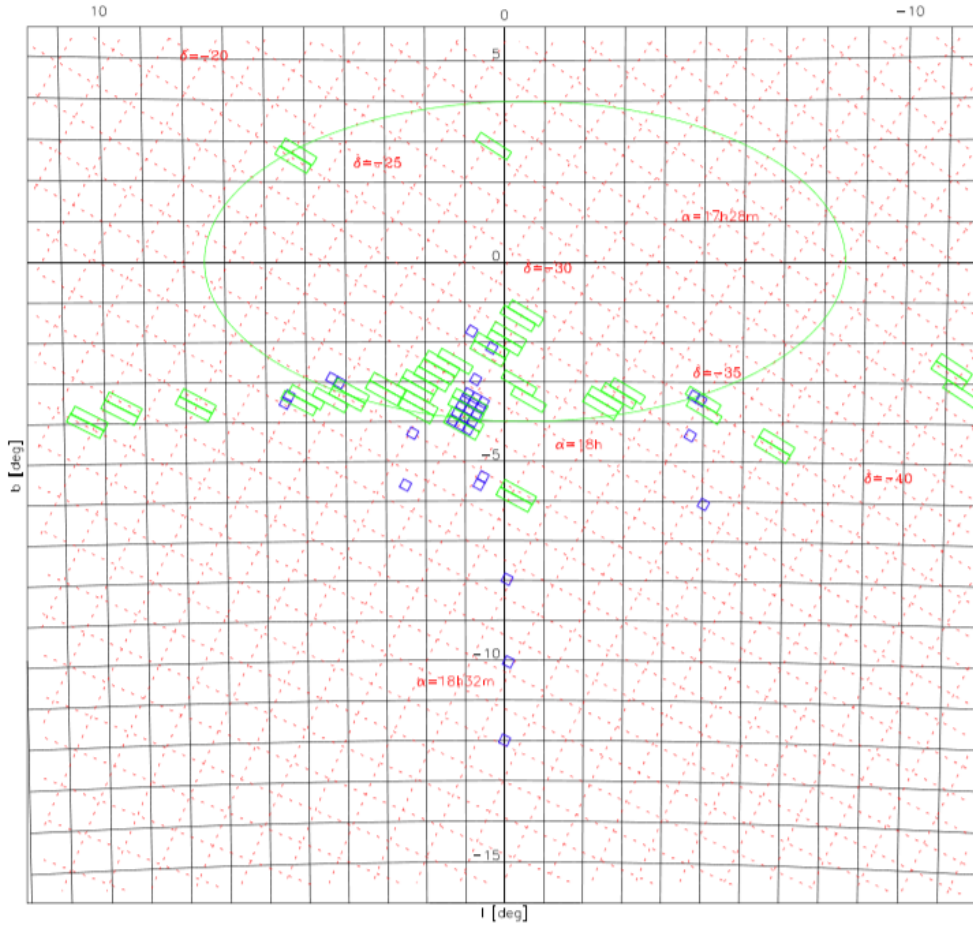


Figura 1.1: Región del bulbo de nuestra Galaxia observada por OGLE-II y dividida en 49 campos.

Por otro lado, la colaboración de Objetos Compactos Masivos del Halo (colaboración MACHO, por sus siglas en inglés Popowski et al(2005)[33]) realizada durante varios años, obtuvo información de la posición de las estrellas medidas y de la variación del flujo luminoso en filtros r y b. Las estrellas estaban en dirección de las galaxias Nube Mayor de Magallanes y Nube Menor de Magallanes y el bulbo de nuestra Galaxia. Las estrellas observadas en nuestra Galaxia fueron divididas en 94 campos (figura 1.2) y entre los objetos medidos se encuentran las estrellas variables.

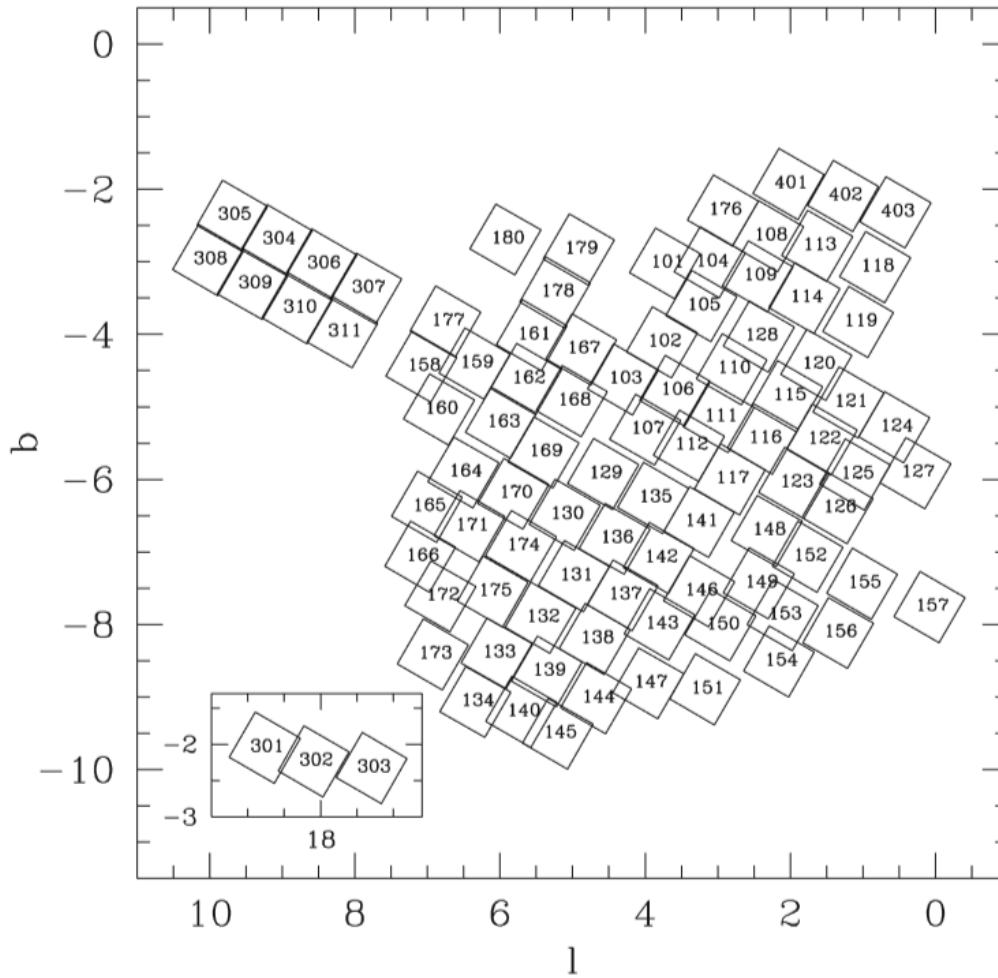


Figura 1.2: Distribución de los 94 campos MACHO [2] en la dirección del bulbo de la Galaxia.

El catálogo OGLE II presenta curvas de luz de estrellas variables medidas solo en filtro I, mientras que el catálogo MACHO utilizó dos filtros (r y b) diferentes al del primer catálogo. Si queremos obtener los parámetros de estos sistemas necesitamos información en varios filtros diferentes. Debido a que las regiones observadas por OGLE II y MACHO son comunes, es válido preguntarse si existen binarias eclipsantes en el catálogo OGLE II que estén contenidos en el catálogo MACHO. Si es así ¿Será posible para cada objeto obtener su curva de luz en los filtros I, r y b correspondientes a ambos catálogos?

## 1.2. HIPÓTESIS

Cada uno de los 49 campos de OGLE II son rectángulos de  $14' \times 57'$  en el cielo, mientras que cada uno de los campos del proyecto MACHO son cuadrados de  $43' \times 43'$ . Ya que los proyectos OGLE II y MACHO han observado aproximadamente las mismas regiones del cielo usando diferentes filtros, podemos esperar que, debido a que algunos de los campos OGLE se superponen a los campos MACHO, deben existir objetos que hayan sido medidos en ambos proyectos de observación. En astronomía los objetos de un catálogo que están contenidos en otro catálogo se conocen como contrapartidas. Si identificamos cuáles de las estrellas variables en el catálogo OGLE II son sistemas binarios eclipsantes, es posible encontrar sus contrapartidas en el catálogo MACHO.

## 1.3. JUSTIFICACIÓN

Las estrellas binarias eclipsantes son importantes en astrofísica porque del estudio de estos objetos se pueden conocer parámetros físicos de las estrellas en general como masa, radio, temperatura (Maceroni (2006) [27], Andersen (1991)[1]. Estas mediciones de masa y radio a su vez permiten realizar pruebas precisas de modelos de evolución estelar, ya que ambas componentes tienen la misma edad y composición química (por ejemplo Pols et al (1997)[32], Guinan et al (2000)[15], Schroder et al (1997)[35], Torres (2002) et al [41]). Con información de las binarias eclipsantes en varios filtros es más fácil poder obtener los valores de esos parámetros. Con un catálogo de estas estrellas en diferentes bandas se pueden escoger aquellas curvas de luz que muestren que son interesantes desde el punto de vista astrofísico porque pueden dar valiosa información de las características de las estrellas. También con este catálogo se puede ver cuáles de ellas pueden ser observadas en un trabajo futuro desde el Observatorio Astronómico de la Universidad Nacional de Ingeniería (OAUNI) instalado en el Observatorio de Huayao (Huancayo).

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. OBJETIVO GENERAL**

La búsqueda de estrellas binarias eclipsantes en la dirección del bulbo de la Galaxia con datos del catálogo de OGLE II.

### **1.4.2. OBJETIVO ESPECÍFICO**

- Encontrar las contrapartidas de las estrellas binarias eclipsantes del catálogo OGLE II en el catálogo MACHO.

- Generar un catálogo con las curvas de luz de las estrellas binarias eclipsantes en diferentes filtros que son I, R y V; los cuales lo obtendremos con los datos de los catálogos OGLE II y MACHO.

# Capítulo 2

## MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

### 2.1. ANTECEDENTES

En las últimas décadas con el advenimiento de nuevas herramientas e instrumentos de observación se han desarrollado diferentes proyectos de observación. Por ejemplo:

- OGLE [29] ha obtenido un catálogo de estrellas variables en diferentes etapas de observación dirigidas en dirección del bulbo de la Galaxia y las galaxias llamadas Nube Mayor y Nube Menor de Magallanes. Este proyecto de observación comenzó en 1992 y se mantiene en la actualidad. El catálogo se obtuvo como subproducto de la búsqueda de materia oscura utilizando la técnica de microlentes gravitacionales en filtro I en las primeras etapas y actualmente en los filtros I y V.

- El proyecto MACHO Popowski et al(2005)[33] se encargó de la búsqueda de materia oscura en dirección de las Nubes Mayor y Menor de Magallanes y el bulbo Galáctico. El proyecto duró casi 6 años a partir de 1992 y como subproducto se obtuvo información de estrellas variables en estos campos usando filtros instrumentales b y r.

- 2MASS (acrónimo en inglés de Two Micron All-Sky Survey)[36] fue un proyecto de observación de todo el cielo realizado durante 1997-2001 usando tres bandas infrarrojas alrededor de los  $2\mu\text{m}$  ( $J=1.25\mu\text{m}$ ,  $H=1.65\mu\text{m}$  y  $K_S=2.17\mu\text{m}$ ). Como resultado se obtuvo un catálogo de 300 millones de objetos observados entre estrellas, cúmulos de estrellas y galaxias. Eso incluye el descubrimiento de 173 enanas marrones.

- ASAS (acrónimo en inglés de All Sky Automated Survey) [20] es un proyecto de observación de estrellas de todo el cielo con magnitud mayor a 14. Este proyecto se ha llevado a cabo en varias etapas comenzando en 1997. Por ejemplo ASAS-2 fue realizado usando el filtro I, mientras que ASAS-3 utilizó el filtro V. Hasta la fecha ASAS ha descubierto 50000 estrellas variables localizadas en una región que cubre 3/4 de todo el cielo.

- Catalina Sky Survey [10], es un proyecto de observación dedicado al descubrimiento y estudio de las trayectorias de los objetos cercanos a la Tierra (NEOs, por sus siglas en inglés). Este proyecto que empezó en el 2004 obtuvo como subproducto un catálogo de 47000 estrellas variables periódicas medidas en banda V.

- CoRoT (acrónimo en inglés de Convection, Rotation an planetary Transits) [6] fue una misión de observación que estuvo operativo entre 2006-2013. Sus objetivos principales fueron la búsqueda de planetas extrasolares de periodo orbital corto y realizar astrosismología midiendo oscilaciones tipo solar en las estrellas. Como subproducto se obtuvo información de estrellas variables en filtro V [19].

- La misión Kepler comenzó en el 2009 con el objetivo de examinar una región de la Vía Láctea para descubrir exoplanetas del tamaño de la Tierra. Como resultado se ha obtenido información fotométrica en magnitudes denominadas Kp (Kepler). Como subproducto se obtuvo información de diferentes tipos de estrellas variables.

- GAIA [4], es una misión iniciada en 2013 cuya finalidad es registrar un mapa tridimensional de nuestra Galaxia para revelar su composición, formación y evolución. El catálogo GAIA se ha liberado en diferentes etapas conteniendo información de diferentes tipos de estrellas. Los datos incluyen posiciones y magnitudes en una banda no filtrada denominada G(330-1050 $\mu$ )[18].

En el cuadro 2.1 se presenta un resumen de los proyectos de observación de las estrellas variables mencionadas líneas arriba.

Cuadro 2.1: Resumen de los principales proyectos de observación de estrellas variables.

PROYECTO DE OBSERVACION	BANDA	AÑOS DE OPERACION
OGLE	I-V	1992-actual
MACHO	b-r	1992-1998
2MASS	J-H-KS	1997-2001
ASAS	I-V	1997-actual
CATALINA SKY	V	2006-actual
CoRoT	V	2006-2013
KEPLER	Kp	2009-actual
GAIA	G	2013-actual

Como resultado de estas observaciones se publicaron catálogos de diferentes tipos de estrellas variables:

- Devor (2005)[8] desarrolló un nuevo método automatizado para búsqueda de estrellas binarias eclipsantes en el bulbo de la Galaxia usando los datos de OGLE II. Su algoritmo denominado DEBiL consta de varias etapas para separar las binarias eclipsantes del conjunto total de estrellas variables. Además obtuvo los parámetros de las binarias eclipsantes con un modelo simplificado considerando a las componentes como estrellas esféricas.

- Derezkas et al (2007)[7] presentaron un catálogo de 6800 binarias eclipsantes observadas por el proyecto MACHO en dirección de la Nube Mayor de Magallanes. Ellos usaron análisis de Fourier para determinar algunos parámetros de estos objetos y clasificarlos.

- Tello, J. y Jablonski, F. (2009)[40] realizaron un procedimiento para identificar estrellas binarias eclipsantes en dirección al bulbo Galáctico usando datos del catálogo OGLE II y obtuvieron sus contrapartidas en el catálogo 2MASS usando el método de análisis de componentes principales y encontraron 281 binarias eclipsantes.

- Prša et al (2011)[34] obtuvieron un catálogo con 1879 binarias eclipsantes observados por la misión Kepler en la región de las constelaciones Cisne-Lira. En este catálogo se presentan los parámetros de las estrellas observadas.



- Pietrukowicz et al (2013)[30] presentaron el análisis de 11589 binarias eclipsantes identificadas por OGLE III en dirección al disco Galáctico en bandas I y V. Además buscaron contrapartidas en rayos X a 220 de estos objetos. Con la ayuda de un algoritmo de búsqueda de objetos de High Energy Astrophysics Science Archive Research Center<sup>1</sup>.

- Chien Hsiu Lee (2015)[26] utilizó dos algoritmos (DeBiL y MECI) para obtener parámetros de 2170 sistemas binarios eclipsantes de nuestra Galaxia identificados por el proyecto Catalina.

Como se puede apreciar existen trabajos publicados acerca de binarias eclipsantes en diferentes regiones como el bulbo de nuestra Galaxia. Sin embargo no hay publicaciones que contengan a las binarias eclipsantes de OGLE II y sus contrapartida en MACHO. En este trabajo desarrollamos un procedimiento para obtener estos objetos usando ambos catálogos en dirección del bulbo Galáctico.

A continuación haremos una revisión sobre los diferentes tipos de estrellas variables.

## 2.2. ESTRELLAS VARIABLES

Una estrella variable es una estrella cuyo brillo varía en intervalos relativamente cortos de tiempo que van frecuentemente desde horas hasta decenas de días, excluyéndose los efectos de centelleo debido a la atmósfera terrestre. Cuanto más brillante es una estrella su flujo luminoso es mayor. En astronomía, se llama magnitud aparente  $m$  de una estrella a una medida de su flujo luminoso  $F$ . La magnitud es adimensional y fue definida por Pogson (1856) [31] como:

$$m = -2,5 \log\left(\frac{F}{F_0}\right) \quad (2.1)$$

donde  $F_0$  es el flujo luminoso constante de una estrella adoptada como referencia y cuya magnitud se creó por convención. Según esta definición, los valores de la magnitud de una estrella es tal que a mayor flujo  $F$  le corresponde un menor valor de magnitud:

Para flujos  $F \leq F_0$ , la magnitud puede tomar valores positivos e incluso cero.

Para flujos  $F > F_0$ , la magnitud puede tomar valores negativos.

Por lo tanto, una estrella de magnitud -1 es más brillante que una segunda estrella

---

<sup>1</sup><https://heasarc.gsfc.nasa.gov/>

de magnitud 0 y ésta es más brillante que una tercera estrella de magnitud +1 y esta tercera será más brillante que una cuarta estrella de magnitud +2, y así sucesivamente.

Cuando se mide el flujo luminoso de una estrella se expresa su brillo en magnitudes. La magnitud aparente de muchas estrellas permanece constante con el tiempo, pero existen estrellas cuya magnitud cambia con el tiempo, por ello se denominan estrellas variables. Para analizar el comportamiento de estas estrellas se representa una gráfica de la magnitud versus el tiempo (figura 2.1). Esta representación en función del tiempo se denomina “curva de luz”. La magnitud puede ser medida en un determinado filtro, por lo que existirán tantas curvas de luz de una misma estrella según los filtros con los que fueron realizadas las medidas de magnitud de la estrella.

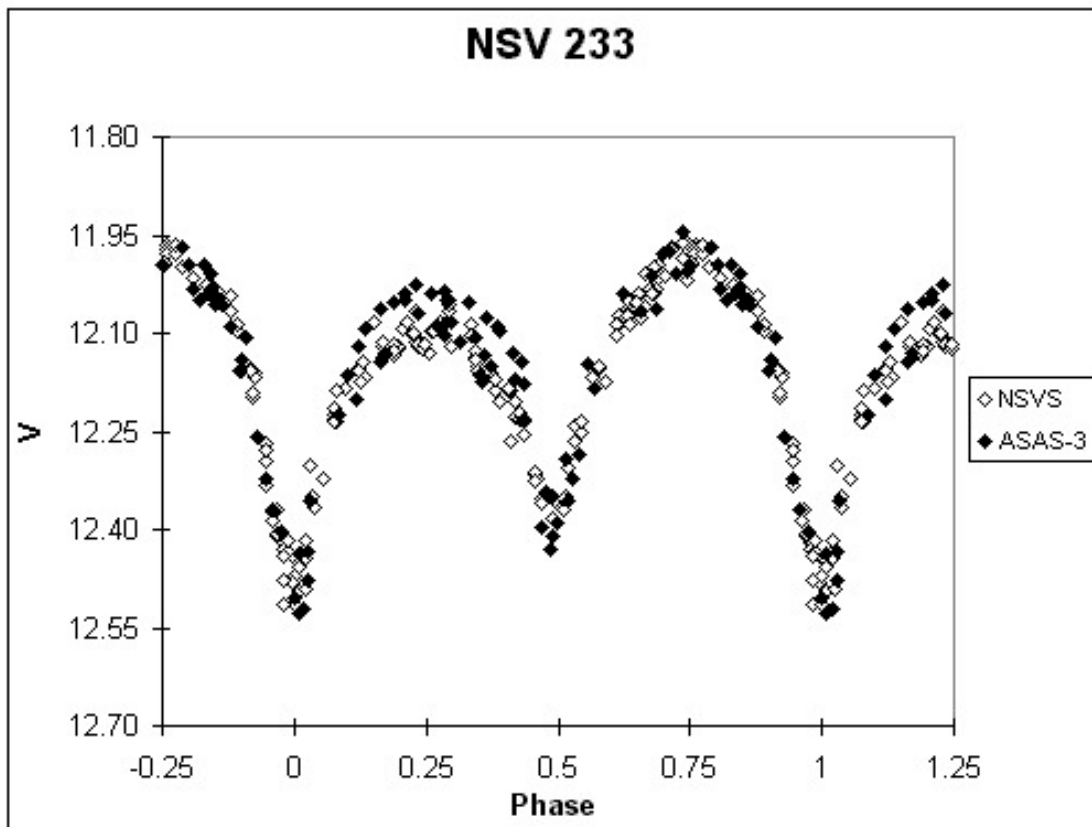


Figura 2.1: Representación de una curva de luz de una estrella variable [21].

Las variaciones de las curvas de luz pueden ser periódicas o no. Si una curva de luz es periódica significa que, después de un tiempo llamado un ciclo, la curva de luz vuelve a repetirse. De esta forma si las medidas corresponden a más de un ciclo, su curva de luz representada en magnitud versus tiempo será una curva que se repite tantas veces

como ciclos se hayan medido.

Si la curva tuviera una variación con periodo  $P$ , se puede calcular la fase  $\Phi$  mediante la expresión:

$$\Phi = \frac{(t_{obs} - T_0)}{P} - \left[ \frac{(t_{obs} - T_0)}{P} \right] \quad (2.2)$$

donde  $\left[ \frac{(t_{obs} - T_0)}{P} \right]$  es el valor entero de esa expresión,  $P$  es el periodo expresado en días,  $t_{obs}$  es el instante de cada observación y  $T_0$  es una época de referencia. Cuando el tiempo de observación sea igual al tiempo de referencia el valor de la fase es 0. Al cabo de un ciclo la fase es 1.

Si en lugar de representar la curva de luz como magnitud versus tiempo, se representa como magnitud versus fase se tendrá una curva de luz por ciclo. A veces al medir la curva de luz de una estrella, su periodo es suficientemente largo que una noche no es suficiente para obtener la curva de luz en un ciclo. Por lo tanto, se puede hacer mediciones en diferentes noches y épocas del año de modo de obtener diferentes partes de la curva de luz hasta cubrir un ciclo entero. De allí la utilidad de representar las curvas de luz en magnitud versus fase.

### 2.3. FECHA JULIANA

La forma más natural de registrar el tiempo sea con fecha y hora, este modo de proceder resultaría muy engorroso si se utilizara en una curva de luz, ya que el mes es una unidad variable. Además, las reformas del calendario de Julio César y Gregorio XIII han supuesto discontinuidades, dando lugar a días que nunca existieron. A estas dificultades se añade el hecho de que no existe un año cero.

La solución a este problema la dio el astrónomo Joseph Justus Scaliger en 1583, y consiste en contar como día 0 el 1 de enero de 4713 antes de Cristo a las 12 horas de Tiempo Universal (TU). El TU es el tiempo registrado desde el meridiano de Greenwich. A partir de ahí se va añadiendo consecutivamente los días transcurridos. A esta fecha dada en número de días se la denomina fecha juliana.

Una consecuencia importante es que el cambio del día juliano se efectúa a las 12 del mediodía y no a las 12 de la noche, lo que hace que, en lugares cercanos al meridiano de Greenwich, como Europa, el día juliano no cambie a lo largo de la noche de

observación. La razón de tomar como origen una fecha tan remota fue la de asegurarse que pudiera asignarse un día juliano a casi todos los fenómenos astronómicos registrados históricamente.

Existen diversos programas que permiten calcular la fecha juliana, una vez conocida la fecha juliana de un día determinado a las 12 de TU, basta con sumar la fracción de día transcurrida hasta la hora de la observación. Debido a la naturaleza periódica de la variación de muchas estrellas, para estos casos, es de interés representar la magnitud no frente a la fecha juliana sino frente a la fase. De esta manera se pueden representar los datos obtenidos a lo largo de distintos ciclos.

El día Juliano Modificado (DJM) es el día Juliano medido a partir de una fecha juliana elegida por convención. De esta forma el DJM se reduce a una expresión con un número de cifras de 4 a 5 enteros. Por ejemplo, los datos del catálogo MACHO tienen como fecha de referencia el día Juliano  $JD_0=2400000.5$ .

El día Juliano Heliocéntrico (DJH) es el día Juliano no medido con respecto al centro del sol. De esta forma se corrige el día juliano medido por un observador en la tierra, cuya posición respecto del sol cambia durante el año.

El día Juliano Heliocéntrico Modificado (DJHM) es el día Juliano Heliocéntrico medido a partir de una fecha juliana elegida por convención. De esta forma el DJM se reduce a una expresión con un número de cifras de 4 a 5 enteros. Por ejemplo, los datos del catálogo OGLE tienen como fecha de referencia el día Juliano Heliocéntrico  $DJH_0=2450000$ .

La diferencia máxima entre el DJ y DJH es de aproximadamente  $8'$ , que es el intervalo de tiempo que la luz demora en llegar entre la tierra y el sol.

## 2.4. RESEÑA HISTÓRICA

Actualmente se conocen miles de estrellas variables y con diferentes variaciones características que las permiten agrupar en diferentes tipos. Sin embargo, en la antigüedad las estrellas eran consideradas inmutables, es decir, se creía que su brillo se mantenía uniforme en el tiempo. Con el desarrollo de las técnicas de observación y conforme se observaban más estrellas y se registraba su brillo fue evidente que muchas de ellas poseían un brillo variable.

La primera estrella variable, descubierta en 1054, fue llamada *Stella nova*, (del latín nueva), pertenece a la Nebulosa del Cangrejo, la cual con el paso del tiempo se englobaría en la categoría de supernovas. Posteriormente, en 1572 el astrónomo danés Tycho Brahe descubrió variabilidad en el brillo de la estrella denominada N1572, o también conocida como “Estrella de Tycho”. En 1596, fue descubierta como variable la estrella denominada o Ceti (o también llamada Mira) por el astrónomo holandés David Fabricius y en 1667  $\beta$  Persei (Algol), por el italiano Geminiano Montanari, posteriormente ambas fueron consideradas prototipos de un gran número de estrellas de características similares.

El primer catálogo de estrellas variables fue creado por Pigott en 1786, el cual contenía 12 objetos, entre ellos 4 pertenecían a la categoría de *novae*, y además habían 39 estrellas candidatas a ser variables. Pero no fue hasta la construcción de los primeros grandes telescopios por W. Herschel, en el año 1780, cuando se produjo el mayor avance en la detección de este tipo de objetos. El propio astrónomo alemán desarrolló entre 1796 y 1799 cuatro catálogos de brillos relativos para 3000 estrellas.

Las búsquedas sistemáticas de estrellas variables se concentraron principalmente sobre regiones densas de la Vía Láctea y de las Nubes de Magallanes. Así, a principios del siglo XX, el número de estrellas variables conocidas ya sobrepasaba el millar. La rápida evolución en la detección de nuevas variables se ve claramente reflejada en su nomenclatura. F. W. Argelander, iniciador también del catálogo BD (Bonner Durchmusterung), en un principio no creyó en la existencia de más de 9 variables por constelación, por lo que las nombró con letras mayúsculas a partir de la R, seguido del nombre de la constelación. Por ejemplo, la estrella R CMa era la primera estrella variable descubierta en la constelación Can Mayor. Dado el creciente aumento de estrellas variables detectadas, pronto se tuvo que comenzar a emplear letras dobles (de RR a RZ, luego de SS a SZ, etc., hasta alcanzar ZZ) e incluso el uso de letras anteriores a la R (de AA a AZ, luego BB a BZ, y así avanzaba hasta ir de QQ a QZ omitiendo la J) para catalogarlas adecuadamente. Con este sistema solo hay 334 posibilidades; así que otra nomenclatura fue introducida por Nijland, que consistía en designar a cada estrella en cada constelación la letra V seguida de un número y del nombre de la constelación. Por ejemplo, la estrella variable descubierta después de QZ de la constelación Perseo se denominaba V335 Per.

Las nuevas tecnologías, como la aparición de las cámaras CCD más sensibles que las placas fotográficas, hicieron que el número de estrellas variables encontradas se aumentara. Así, en 1982, se conocía la existencia de 28484 variables sólo en nuestra Galaxia (General Catalogue of Variable Stars[22]). Hasta el año 2006, gracias a la mejora constante de los detectores, así como al lanzamiento de satélites observando desde el espacio, se han llegado a catalogar más de 40000 estrellas variables.

Toda la información que se tiene sobre las propiedades físicas de las estrellas proviene de los estudios de sus espectros. Estudiando la intensidad de varias líneas de absorción, se pueden deducir masas estelares, temperaturas y composiciones. Las líneas espectrales contienen información detallada sobre los procesos atmosféricos. La luz de una estrella se puede dispersar en un espectro por medio de un prisma o una red de difracción. La distribución de la densidad de flujo de energía sobre la frecuencia puede ser derivada. Las líneas en los espectros estelares son principalmente líneas oscuras de absorción, pero en algunos objetos también se producen líneas de emisión brillantes. De una manera muy simplificada, se puede pensar que el espectro continuo proviene de la superficie caliente de la estrella.

Los espectros de estrellas se clasifican sobre la base de la intensidad de las líneas espectrales. El esquema de clasificación espectral en uso presente se desarrolló en el Observatorio de Harvard en los Estados Unidos a principios del siglo XX. El trabajo fue realizado por Henry Draper quien en 1872 tomó la primera fotografía del espectro de Vega. Más tarde, la viuda de Draper donó el equipo de observación y una suma de dinero al Observatorio de Harvard para continuar con el trabajo de clasificación. La parte principal de la clasificación fue creada por Annie Jump Cannon. En total, más de 390,000 estrellas fueron clasificadas en Harvard.

La clasificación de Harvard se basa en líneas que son principalmente sensibles a la temperatura estelar, más que a la gravedad o luminosidad. Líneas importantes son las líneas de hidrógeno de Balmer, las líneas de helio neutro, las líneas de hierro, el doblete H y K de calcio ionizado a 396.8 y 393.3nm, la banda G debido a la molécula CH y algunos metales alrededor de 431nm, la línea neutral de calcio a 422.7 nm y las líneas de óxido de titanio (TiO).

Los tipos principales en la clasificación de Harvard se indican con letras mayúsculas. Inicialmente se ordenaron en orden alfabético, pero posteriormente se observó que

podían ordenarse de acuerdo con la temperatura.

Las notaciones adicionales son Q para las novae, P para las nebulosas planetarias y W para las estrellas Wolf-Rayet. La clase C contiene los tipos espectrales R y N. Las clases espectrales C y S representan ramas paralelas a los tipos G-M, que difieren en su composición química superficial. La adición más reciente son las clases espectrales L y T que continúan la secuencia más allá de M, representando enanas marrones.

Las estrellas O y B se llaman estrellas de tipo temprano, porque están en la parte superior de la secuencia espectral. Dentro de cada clase espectral hay varias subclases, por ejemplo, BO, B1, . . . , B9. Las estrellas BO, B1, B2, B3 se denominan estrellas B tempranas; B7, B8, B9 son estrellas B tardías [3]. Las principales características de las diferentes clases son:

- **O**. Estrellas azules, temperatura superficial 30000K-50000K. Espectro con líneas de átomos varias veces ionizados, p.ej. HeII, CIII, NIII, OIII, SiV. HeI visible, líneas HI débiles.

- **B**. Estrellas azul-blancas, temperatura superficial alrededor de 15000K-30000K. Las líneas de HeII han desaparecido, las líneas HeI (403nm) son más fuertes en B2, luego se debilitan y desaparecen en el tipo B9. La línea K de CaII se vuelve visible en el tipo B3. Las líneas H se hacen más fuertes. Líneas OII, SiII y MgII visibles.

- **A**. Estrellas blancas, temperatura superficial alrededor de 9000K. Las líneas HI son muy fuertes en A0 y dominan todo el espectro, luego se vuelven más débiles. Las líneas H y K de Ca II se vuelven más fuertes. La línea HeI ya no es visible. Las líneas de metal neutro comienzan a aparecer.

- **F**. Estrellas blanco amarillento, temperatura de la superficie alrededor de 7000K. Las líneas HI se vuelven más débiles, H y K de CaII se vuelven más fuertes. Muchas otras líneas de metal, p.ej. FeI, FeII, CrII, TiII, aparecen cada vez más fuerte.

- **G**. Estrellas amarillas como el Sol, temperatura superficial de aproximadamente 5500K. Las líneas HI siguen debilitándose, las líneas H y K son muy fuertes, más fuertes en G0. Líneas metálicas cada vez más fuertes. Banda G claramente visible. Líneas CN vistas en estrellas gigantes.

- **K**. Estrellas amarillas naranjas, temperatura superficial de aproximadamente 4000K. Espectro dominado por líneas de metal. Líneas HI insignificantes. Línea CaI 422.7 nm claramente visible. Fuertes líneas H y K y banda G. Las bandas de Ti O se

vuelven visibles en K5.

- **M.** Estrellas rojas, temperatura superficial alrededor de 3000K. Bandas de TiO cada vez más fuertes. Línea Ca I 422.7nm muy fuerte. Muchas líneas metálicas neutrales.

- **L.** Estrellas marrones (realmente rojo oscuro), temperatura superficial alrededor de 2000K. Las bandas TiO y VO desaparecen para la clase L temprana. Líneas muy fuertes y amplias de Na I y KI.

- **T.** Enanas marrones, temperatura superficial de aproximadamente 1000K. Bandas de absorción molecular muy fuertes de CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>O.

- **C.** Estrellas de carbono, anteriormente R y N. Estrellas muy rojas, temperatura superficial de aproximadamente 3000K. Bandas moleculares fuertes, p.ej. C<sub>2</sub>, CN y CH. Sin bandas de TiO. Espectro de línea como en los tipos K y M.

- **S.** Estrellas rojas de baja temperatura (alrededor de 3000 K). Bandas de ZrO muy claras. También otras bandas moleculares, p.ej. YO, LaO y TiO.

El diagrama Hertzsprung-Russell (HR) es una representación de la luminosidad de una estrella en función de la temperatura superficial o alternativamente es una presentación de la magnitud absoluta versus el tipo espectral.

La mayor cantidad de estrellas se encuentran en la llamada secuencia principal HR (ver figura 2.2). Una estrella en secuencia principal es aquella que esta generando energía por conversión de hidrógeno en helio por la reacción nuclear que ocurre al interior de su núcleo.



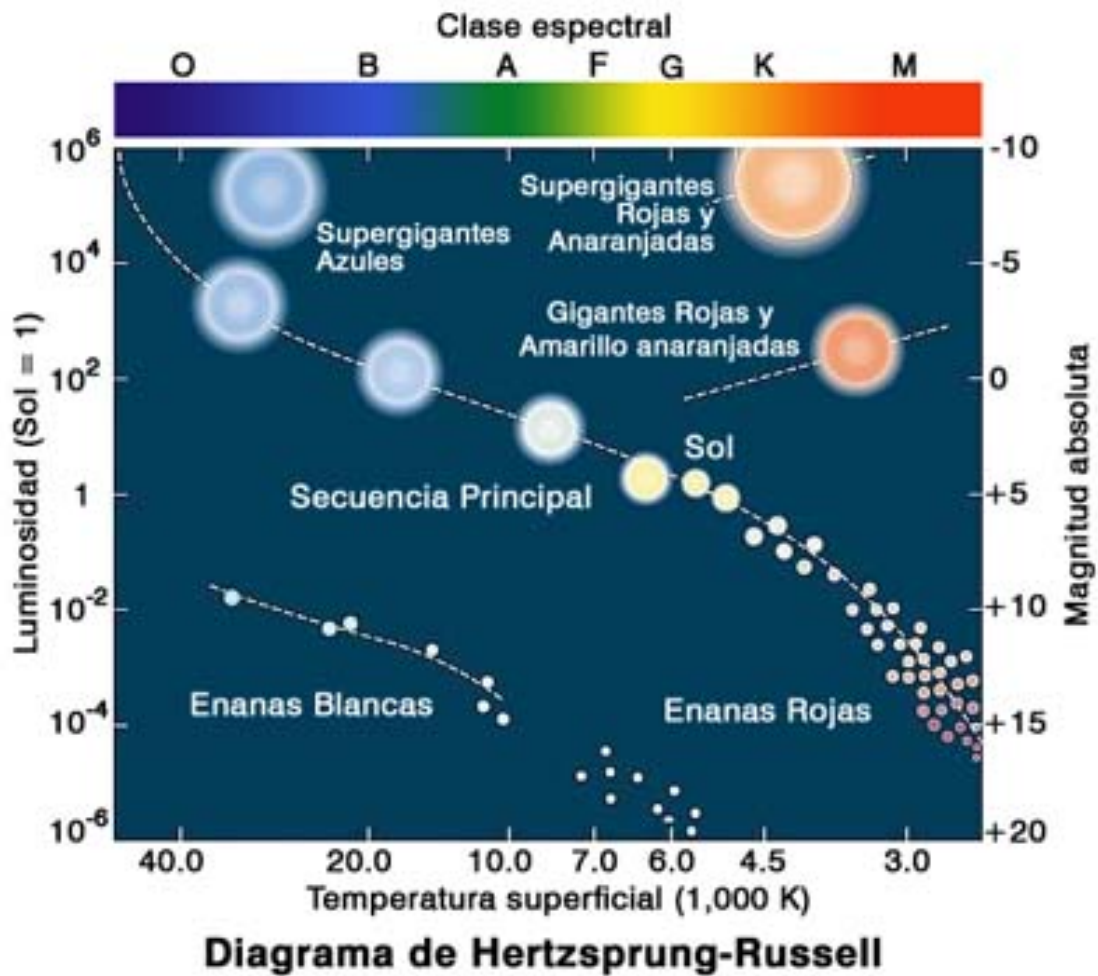


Figura 2.2: Ubicación de los principales tipos de variables en el diagrama HR.

## 2.5. CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRELLAS VARIABLES

El origen de la variabilidad es diverso, y tiene lugar en estrellas en distinto estado evolutivo y por tanto el número de variables conocidas ha crecido constantemente a medida que la precisión observacional ha mejorado. Dependiendo de la ubicación de las variables en el diagrama HR, podemos distinguir entre dos tipos de estrellas variables: las estrellas variables intrínsecas y las estrellas variables extrínsecas.

### 2.5.1. VARIABLES INTRÍNSECAS

Son estrellas donde los cambios de luminosidad son causados por las mismas propiedades físicas de las estrellas. Por ejemplo, la estrella se expande y se contrae periódicamente haciendo que su brillo también varíe. La curva de luz de este tipo de estrella variable es característica de modo que viendo ella puede identificársela de entre variables de otro tipo.

Las variables intrínsecas se dividen en 3 tipos:

#### A.) VARIABLES PULSANTES

Este tipo de variable se caracteriza por tener variaciones periódicas en luminosidad y de cálculos de velocidad radial efectuados por mediciones espectroscópicas se sabe que la variabilidad es causada por expansiones y contracciones de las capas externas de la estrella [14]. Ello da lugar al desplazamiento por efecto Doppler que se observan en las líneas espectrales. Dentro de las variables pulsantes podemos encontrar:

- **Cefeidas**. Son estrellas con períodos de variabilidad que varían aproximadamente entre 1 y 50 días. En la figura 2.3 se muestra la relación período-luminosidad para las cefeidas.

- $\beta$  **Cefeidas**. Pulsantes azules de tipo espectral entre B0 y B3 que se sitúan ligeramente por encima de la secuencia principal.

- **RR Lyrae**. Son estrellas de tipo espectral A a F que padecen de pulsaciones radiales con períodos de 0.2 a 1.2 días y amplitudes de 0.2 a 2 mag.

- **Mira Ceti (o Ceti)**. Son gigantes variables de largo período con tipos espectrales tardíos.

- **RV Tauri**. Son supergigantes de tipo espectral F y G en el máximo de la curva de luz y K a M en el mínimo.

- $\delta$  **Scuti**. Son estrellas pulsantes de tipo espectral A2 a F0 con amplitudes de variación de 0.003 a 0.9 mag y períodos de 0.01 días a 0.15 días. La curva de luz es un calco casi exacto de la curva de velocidad radial.

- **ZZ Ceti**. Son enanas blancas con pulsaciones no radiales.

- **Semirregulares**. Son gigantes y supergigantes de tipo espectral intermedio o tardíos (M,C o S).

-  $\gamma$  **Doradus**. Habitualmente son estrellas jóvenes con tipo espectral F.

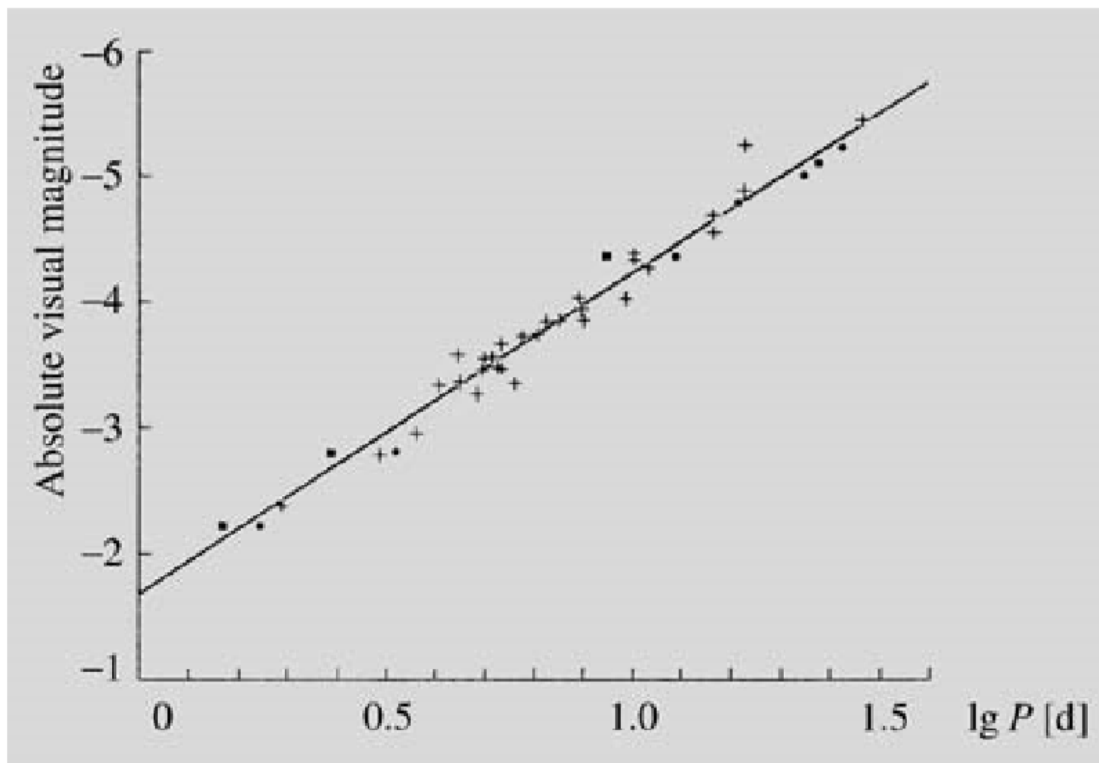


Figura 2.3: En esta figura se observa una relación lineal entre la magnitud visual absoluta y el logaritmo del periodo expresado en días. Sin embargo la ecuación varía según la galaxia donde se encuentran las Cefeidas [28].

## B.) VARIABLES ERUPTIVAS

Las variables eruptivas son estrellas cuyo brillo varía como consecuencia de procesos violentos que pueden ir desde pequeñas erupciones, como es el caso de las “flare Stars”, hasta la explosión de la estrella entera, como en el caso de las supernovas. Los cambios de brillo van habitualmente acompañados por eyecciones de envolturas o de materia bajo la forma de viento estelar de intensidad variable. Entre las variables eruptivas mencionamos los siguientes tipos:

- **Fulgurantes (UV Ceti)**. Estrellas enanas rojas, que emiten “llamarada” en periodos sumamente cortos.

- **FU Ori**. Estrellas con variaciones irregulares, entre los tipos espectrales A y G, con periodos que pueden abarcar varios años y variaciones entre 2 y 6 magnitudes.

- **G Cas.** Estrellas caracterizadas por una rápida rotación, la cual hace que se expulse materia y origina las variaciones de luminosidad.

- **T Tauri.** Se encuentran frecuentemente en nebulosas con estrellas en formación, donde se piensa que la energía liberada al condensarse el núcleo, producen los enormes destellos que pueden aumentar hasta miles de veces su luminosidad. Son irregulares tanto en el periodo como en su variación de magnitudes.

- **S Doradus.** Estrellas también conocidas como variables azules luminosas, aluden a hipergigantes muy brillantes que cambian de brillo en periodos irregulares, con una variación entre 1 y 7 magnitudes.

- **R Coronae Borealis.** Estrellas supergigantes que alcanzan su mayor luminosidad en un periodo de varios meses o años, con variación de entre 5.8 y 14.8 magnitudes. Suelen ser de tipo espectral R. En la figura 2.4 se puede ver que la magnitud de la estrella decae durante aproximadamente 300 días. Esta caída puede ser producida por la rápida condensación de polvo de carbono que impide que la luz salga de la estrella.

- **RS Canum Venaticorum.** Estrellas en sistemas binarios con variaciones casi periódicas. Su variación la producen “manchas” de tamaño mucho mayor que las manchas solares. El periodo de variación está relacionado al periodo orbital, con variaciones entre 0.2 a 0.6 magnitudes.

- **Wolf Rayet.** Estrellas muy masivas, luminosas y de altas temperaturas con expulsiones regulares de mucho material causando variaciones de 0.1 magnitudes.

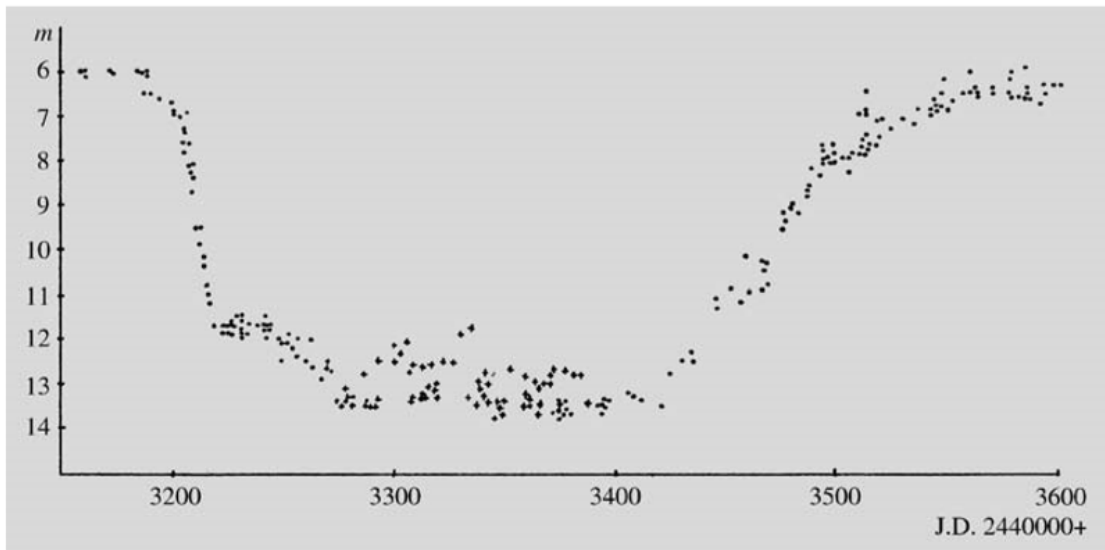


Figura 2.4: Curva de luz para la R Coronae Borealis [?].

### C.) VARIABLES CATACLÍSMICAS

Aquellas que sufren un cambio violento, súbito y cataclísmico en sus propiedades físicas, mediante una explosión termonuclear, la cual puede ocurrir en sus regiones superficiales (como una nova) o en sus regiones internas (como una supernova). Suelen consistir en sistemas binarios donde una estrella enana y caliente atrae por gravitación el material de una estrella compañera gigante y fría. En esta categoría existen las siguientes divisiones:

- Novas. Ocurren en enanas blancas de alta temperatura, caracterizadas por atraer material de una estrella compañera gigante y fría acumulando dicho material en un disco de acreción que, llegado el momento, ejecuta reacciones que originan una súbita explosión superficial, con un destello que puede ir entre 7 y 18 magnitudes.

- Supernovas. Ocurren cuando una estrella supergigante roja explota destruyéndose prácticamente por completo mediante una violenta explosión mucho más brillante que una nova, con ascensos de brillo hasta 20 magnitudes. El descenso del brillo es gradual, del orden de algunos meses (figura 2.5), tras lo cual lo único que queda es un remanente de gases mucho menos brillante, además de una estrella de neutrones o agujero negro.

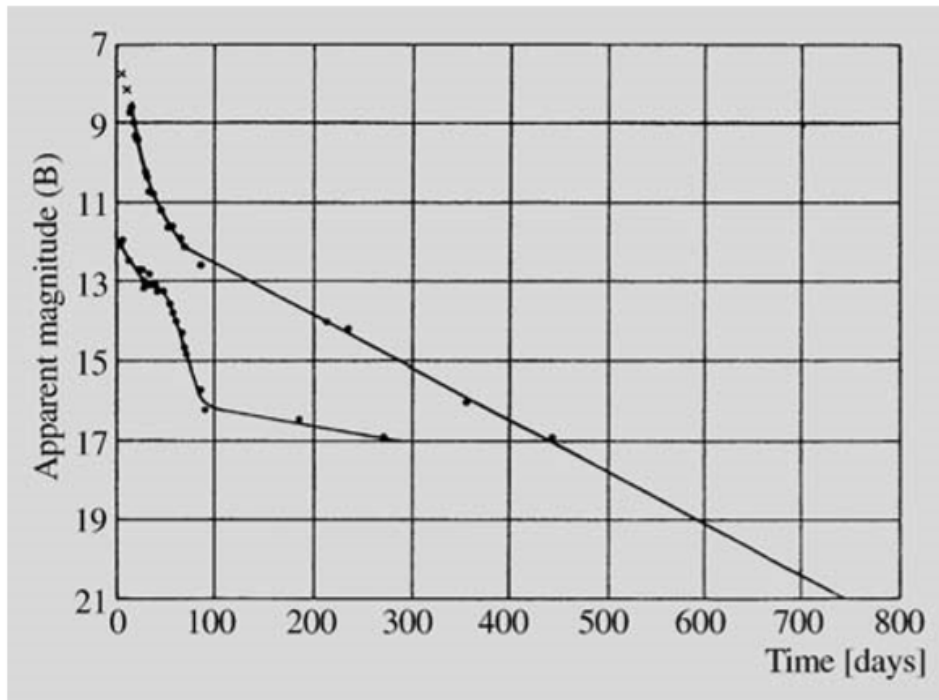


Figura 2.5: Curva de luz de una Supernova, mostrando un descenso en el brillo de 12 magnitud en 800 días [24].

### 2.5.2. VARIABLES EXTRÍNSECAS

Son aquellas estrellas en las que la variación de luminosidad no se debe a ningún cambio físico de la estrella, sino a factores externos, como pueden ser la rotación de la estrella y la variación de la temperatura.

#### BINARIAS ECLIPSANTES

Su variabilidad se debe a la geometría del sistema ya que su plano orbital está en dirección de la línea visual del observador. Esta disposición del plano orbital produce que durante un ciclo orbital una de las componentes se interponga entre el observador y la segunda componente, ocultándose la luz de la estrella y como resultado se observa un eclipse estelar. Finalizado el eclipse, ambas componentes continúan moviéndose alrededor del centro de masa del sistema y antes de completar una órbita completa se produce un segundo eclipse, esta vez de la primera componente debido a la interposición de la segunda componente.

Estos sistemas están tan lejanos de nosotros que no pueden ser resueltos en sus dos componentes ni aún con grandes telescopios, pero sabemos que se trata de un sistema binario por la forma característica de su curva de luz: en cada órbita del sistema se producen dos eclipses y, por tanto, su curva de luz presenta dos mínimos que corresponden a las variaciones que se producen en cada eclipse ver figura 2.6.

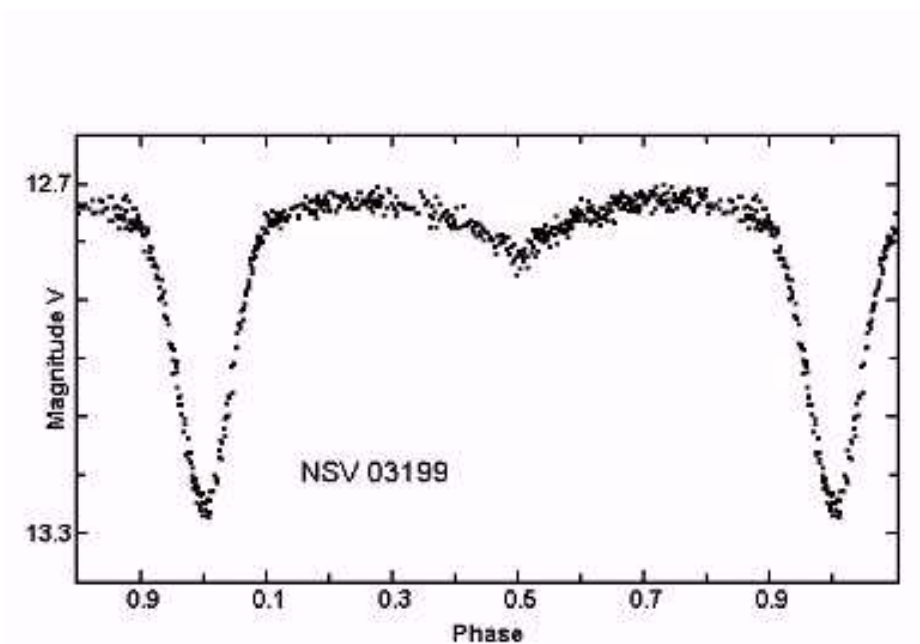


Figura 2.6: Curva de luz de una binaria eclipsante [13].

En este trabajo estudiaremos un tipo de estrellas binarias, que son al mismo tiempo estrellas variables, pero en general todo sistema binario no es una estrella variable. En la siguiente sección profundizaremos con más detalle sobre las propiedades de las binarias y sus diferentes tipos.

## 2.6. ESTRELLAS BINARIAS

Las estrellas pueden dividirse en dos categorías. Existen estrellas simples como el Sol, tal vez con planetas alrededor, y existen también sistemas de estrellas múltiples. Estos sistemas múltiples pueden estar formados por 2 o más estrellas unidas por la fuerza gravitacional entre sus componentes y que se mueven en órbitas ligadas alrededor

de su centro de masa. Un sistema formado por dos estrellas se denomina un sistema binario.

Los programas de observación (Abt, 1983) han demostrado que las estrellas simples son al menos tan comunes como las binarias, es decir más del 50% de las estrellas pertenecen a sistemas que contienen dos o más miembros. En general, los sistemas múltiples tienen una estructura jerárquica: sistemas ternarios están formados por un sistema binario y una tercera componente orbitando alrededor; sistemas cuádruples estarían formado por dos binarias orbitando una alrededor de la otra. Por tanto, la mayoría de los sistemas múltiples pueden describirse como binarios en distintos niveles.

Es necesario distinguir los sistemas binarios de los pares ópticos. A menudo, dos estrellas pueden parecer estar cerca en el cielo, aunque en realidad están a distancias muy diferentes de nosotros. Tales estrellas dobles se llaman pares ópticos y no están unidos por fuerzas gravitatorias. Por el contrario, los sistemas binarios están aproximadamente a la misma distancia del observador y forman un sistema físico.

Las estrellas en un sistema binario se mueven en órbitas elípticas alrededor de su centro de masa. Se puede demostrar que la órbita relativa de una componente alrededor de la otra es también una elipse y por lo tanto las observaciones se describen a menudo como si una de las componentes permaneciera en reposo y la otra se moviera a su alrededor.

Midiendo la separación relativa de las componentes en el cielo  $\rho$  y el ángulo de posición  $\Theta$  (en segundos de arco ó ") a lo largo del tiempo, podemos obtener la órbita aparente del sistema y calcular el valor del semieje aparente  $a$  (en segundos de arco) y el periodo orbital  $P$ . Si además conocemos la distancia  $d$  a la que se encuentra la binaria, entonces podemos reducir las dimensiones angulares de la órbita a dimensiones lineales a partir de la siguiente relación:

$$a(UA) = a(")d(UA) \quad (2.3)$$



donde  $a''$  y  $a(UA)$  son el semieje orbital, en segundos de arco y en Unidades Astronómicas<sup>2</sup>, respectivamente y  $d(UA)$  es la distancia del sistema binario en unidades astronómicas (UA).

La masa total  $m = m_1 + m_2$  del sistema, está relacionada con el período  $P$  y el semieje orbital  $a$  según la tercera ley de Kepler,

$$\frac{P^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)} \quad (2.4)$$

donde  $m_1$  y  $m_2$  son las masas de las componentes.

Si expresamos el periodo  $P$  en años, el semieje  $a$  en unidades astronómicas (UA) y las masas en masas solares ( $M_\odot$ ) la tercera ley de Kepler se reduce a:

$$a^3 = (m_1 + m_2)P^2 \quad (2.5)$$

En esta expresión se observa que mientras sea mayor el semieje  $a$ , mayor será el período orbital  $P$ .

Las masas de las componentes individuales se pueden determinar observando los movimientos de ambas componentes relativos al centro de masas. Si el semieje mayor de la órbita de una de las componentes es  $a_1$  y el semieje mayor de la órbita de la otra componente es  $a_2$ , entonces, de la ecuación del centro de masas resulta:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1} \quad (2.6)$$

El semieje mayor de la órbita relativa es:

$$a = a_1 + a_2 \quad (2.7)$$

### 2.6.1. TIPOS DE ESTRELLAS BINARIAS

Los sistemas binarios pueden clasificarse según la separación de sus componentes. En binarias distantes, la separación entre las componentes es de decenas a cientos de UA y sus periodos orbitales van desde decenas a miles de años. En las binarias

---

<sup>2</sup>Una Unidad Astronómica (UA) se define como la distancia que hay entre la tierra y el sol, una UA = 149597870.7 km.

cercanas, la separación va desde alrededor de una UA hasta alrededor del orden de un radio estelar y los periodos orbitales van desde pocas horas hasta algunos años.

Las binarias también se pueden clasificar según el método de descubrimiento:

- **Binarias Visuales**, son aquellas binarias descubiertas en las que pueden distinguirse las dos estrellas componentes separadas en el cielo, es decir que la separación entre las estrellas es mayor que  $\sim 0.1''$ . Puede observarse que la posición relativa de las componentes cambia con el tiempo a medida que una se mueve alrededor de la otra.

- **Binarias Astrométricas**, que son aquellos sistemas donde sólo se puede observar una componente, pero su movimiento propio oscilatorio muestra que debe estar presente una segunda componente invisible.

- **Binarias Espectroscópicas**, que se descubren a partir de registrar su espectro. Debido al corrimiento Doppler, se observa que la posición de un conjunto o dos conjuntos de líneas espectrales oscilan periódicamente. Si aparece sólo un conjunto de líneas que oscilan de posición indicaría que una estrella está orbitando al rededor de otra cuyo espectro no es visible.

- **Binarias Fotométricas** o también llamadas **Binarias Eclipsantes**. En estos sistemas, las componentes del par pasan regularmente una frente a la otra, causando un cambio en la magnitud total aparente.

Las estrellas binarias son la principal fuente de datos fundamentales de masas y radios estelares, lo cuales se determinan con gran precisión a partir del análisis de sus curvas de luz y de velocidad radial. La masa y la composición química iniciales de una estrella determinan, en principio, todas sus propiedades en función de la edad, siendo las variaciones en radio y luminosidad las consecuencias más visibles de su evolución. Además, el conocimiento de estos parámetros, para estrellas aisladas, sirve de base para el cálculo de las propiedades globales y evolutivas de los cúmulos estelares. Por tanto, los radios y masas estelares son datos astrofísicamente fundamentales, siendo el Sol la única estrella para la que el conjunto de los cinco parámetros, radio y masa además de la luminosidad, composición química y edad, pueden medirse directamente.

Aunque existen técnicas para determinar los radios y luminosidades de algunas estrellas cercanas, la masa de una estrella distinta al Sol solo puede ser determinada en forma directa si la estrella está localizada en un sistema binario visual donde las dos componentes sean observables. Si este no es el caso, la masa debe deducirse a partir

de parámetros observables (fotométricos o espectroscópicos) calibrados por medio de estrellas binarias que hayan sido bien observadas. Tales calibraciones implican el uso de cálculos de estructuras estelares, lo cual ayuda a ubicar la estrella dentro del proceso de evolución estelar. Por otro lado, es necesario la comprobación de los modelos evolutivos con estrellas reales para poder conseguir modelos cada vez más realistas ya que, en la práctica, la física básica de los modelos está sujeta a un gran número de limitaciones, que actualmente están siendo resueltas con gran celeridad y satisfacción.

### **A.) BINARIAS VISUALES**

Son aquellas en las que se pueden resolver ambas componentes del sistema, ya sea por observación directa con telescopios o por métodos interferómetros. En general, en este tipo de binarias ambas componentes son visibles en la imagen. Estas binarias suelen estar no muy lejos de nosotros, pero sí están bastante alejadas entre sí. Por ejemplo, la binaria visual  $\alpha$  Centauri cuyas componentes  $\alpha$  Cen A y  $\alpha$  Cen B, están separados aproximadamente por una distancia de 23 UA y están a 4.3 años luz de nosotros ( $2.7 \times 10^6$  UA). A pesar de su fácil observación, no suelen ser tan fáciles de detectar que ambas estrellas forman un sistema binario. Tienen periodos orbitales que suelen ser del orden de cientos de años. Para poder apreciar el movimiento mutuo de las binarias visuales hay que comparar las imágenes del cielo en años distintos. A veces su movimiento es tan impredecible que se requieren placas fotográficas o imágenes con décadas de diferencia. Este elevado tiempo de análisis hace que, aun hoy, este tipo de binarias sea el más complicado de detectar. Las binarias visuales proveyeron las primeras determinaciones reales de las masas de las estrellas (sin considerar al Sol).

Dado que las masas individuales de las binarias visuales no pueden ser determinadas de la órbita relativa, se requieren de mediciones astrométricas más complejas para obtener el movimiento de cada componente proyectado en el plano del cielo.

Al resolver ambas estrellas individualmente, podemos obtener sus espectros separados deduciéndolos las características de los astros individuales: tipo espectral, clase de luminosidad, radio, temperatura etc. Combinando los datos espectrales con los orbitales, este tipo de estrellas binarias pueden ser útiles para calibrar mejor nuestros sistemas de clasificación estelar.

## B.) BINARIAS ASTROMÉTRICAS

En este tipo de binarias solo se puede observar la órbita de la componente más brillante sobre el centro de masa del sistema. Si se estima la masa de la componente visible, entonces también puede ser estimada la masa de la componente invisible. Son un grupo reducido de estrellas en las cuales se observa una anomalía o balanceo en el movimiento propio de la componente primaria. Este movimiento está generado por el efecto que realiza sobre la estrella principal la componente secundaria.

La primera binaria astrométrica fue Sirio en el año 1830, a la cual se le observó que tenía un movimiento propio oscilatorio. Se descubrió visualmente unas décadas más tarde que tenía una compañera pequeña. La compañera Sirio B, era un tipo de estrella completamente nueva, una enana blanca. Al igual que las binarias visuales, las binarias astrométricas necesitan tener largos periodos de observación.

## C.) BINARIAS ESPECTROSCÓPICAS

Las estrellas binarias espectroscópicas se observan como estrellas simples, pero sus espectros muestran una variación regular. La primera binaria espectroscópica fue detectada en el año 1880, cuando se encontró que las líneas espectrales de la estrella Mizar (de la constelación UMa) se dividían en dos líneas a intervalos regulares.

El corrimiento Doppler de las líneas espectrales es directamente proporcional a la velocidad radial relativa al observador. Así, la separación de las líneas espectrales es mayor cuando una componente se está acercando y la otra alejando del observador. La separación de las líneas espectrales varía con un periodo que es igual al periodo orbital de las estrellas. Desafortunadamente no hay una manera general de determinar la posición de la órbita en el espacio. La velocidad observada  $v$  está relacionada con la velocidad verdadera  $v_0$  según:

$$v = v_0 \sin(i) \quad (2.8)$$

donde la inclinación  $i$  es el ángulo entre la línea de la visual y la normal al plano orbital.

Consideremos una binaria donde las componentes se muevan en órbitas circulares alrededor de su centro de masas. Sean los radios de las órbitas  $a_1$  y  $a_2$ . De la definición

de centro de masas  $m_1 a_1 = m_2 a_2$  y escribiendo  $a = a_1 + a_2$ , se obtiene:

$$a_1 = \frac{a m_2}{m_1 + m_2} \quad (2.9)$$

La velocidad orbital verdadera de la componente 1 es:

$$v_{0,1} = \frac{2\pi a_1}{P} \quad (2.10)$$

Donde P es el periodo orbital. De acuerdo con la ecuación (2.8), la velocidad orbital observada es:

$$v_1 = \frac{2\pi a_1 \sin i}{P} \quad (2.11)$$

Sustituyendo la ecuación (2.9) en la ecuación (2.11), se obtiene

$$v_1 = \frac{2\pi a}{P} \frac{m_2 \sin i}{m_1 + m_2} \quad (2.12)$$

Despejando para  $a$  y sustituyendo en la tercera ley de Kepler, se obtiene la llamada ecuación de la “función de masa”

$$f(m) = \frac{m_2^3 \sin^3 i}{(m_1 + m_2)^2} = \frac{v_1^3 P}{2\pi G} \quad (2.13)$$

Si una de las componentes en un sistema espectroscópico es tan débil que sus líneas espectrales no se pueden observar, solo se determinan P y  $v_1$ . Este tipo de binarias se les suele designar en la literatura como “SB1”, por sus siglas en inglés. La ecuación (2.13) da el valor de la función de masa, y con ello aún no se pueden determinar ni las masas de las componentes, ni la masa total. Si se observan las líneas espectrales de ambas componentes de la binaria, llamaremos al sistema como binaria espectroscópica de doble línea o “SB2”. Entonces se conoce también  $v_2$  y usando la ecuación (2.11) para la segunda componente da:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{a_1}{a_2} \quad (2.14)$$

Y además de la definición del centro de masas se obtiene:

$$m_1 = \frac{m_2 v_2}{v_1} \quad (2.15)$$

Cuando se sustituye esto en la ecuación (2.13) se pueden determinar  $m_2 \text{sen}^3 i$  y  $m_1 \text{sen}^3 i$ . sin embargo, las masas individuales no se obtienen sin saber la inclinación.

El tamaño de la órbita de la binaria (semieje mayor  $a$ ) se obtiene de la ecuación (2.11) aparte del factor  $\text{sen } i$ . En general las órbitas de las estrellas binarias no son circulares y no pueden aplicarse las expresiones anteriores. Para una órbita excéntrica, la forma de la variación de la velocidad se aparta cada vez más de una curva sinusoidal a medida que la excentricidad crece.

## 2.6.2. BINARIAS FOTOMÉTRICAS

Estos sistemas binarios presentan una variación periódica de su brillo total por el movimiento orbital de sus componentes. Se denominan binarias “fotométricas”, debido a que el estudio de las variaciones de la luz se realiza, hoy en día, con dispositivos fotométricos.

En general, las binarias fotométricas presentan variaciones de brillo cuando una de las componentes del sistema oculta, total o parcialmente, a la otra componente durante su movimiento orbital, causando una atenuación del brillo o “eclipse” en forma periódica. Estas binarias se denominan “eclipsantes”. El plano orbital de las binarias eclipsantes, tienen una inclinación próxima a  $90^\circ$  respecto al plano del cielo, de modo que, con respecto a la visual, cada vez que una pasa por delante de la otra en su órbita da lugar a una variación periódica de la luz recibida.

Existe otra clase de binarias fotométricas, en las cuales no hay eclipses reales. En ellas, al menos una de las componentes ha sido deformada por los efectos de marea producidos por la otra y presenta una simetría elipsoidal. En diferentes fases de la órbita, el área de la superficie proyectada de la componente distorsionada varía, y además la temperatura superficial es menor en las zonas con mayor deformación de marea. Esto causa variaciones de brillo de baja amplitud, del orden de decimas de magnitud, que dificultan su detección y análisis. Estas binarias se denominan variables “elipsoidales” (ELL).

Ya que en general las binarias fotométricas no son binarias visuales, la luz que vemos o medimos con aparatos fotométricos, es la suma de los brillos individuales. A esta suma le llamaremos luz integrada.

En general, las curvas de luz de las binarias eclipsantes presentan dos mínimos diferentes, uno de los cuales, el mínimo primario, se le llama al mínimo más profundo que el otro. Esto se debe a la diferencia de temperatura de sus componentes. Cuando la estrella más caliente eclipsa a su compañera, hay un mínimo menos profundo en la curva de luz. Fuera de los eclipses, si las componentes están lo suficientemente separadas, la magnitud total permanece constante o a lo más varía ligeramente.

Para representar las curvas de las variables eclipsantes expresadas en fase se adopta como  $T_0$  al instante en que ocurre el mínimo del eclipse primario o el mínimo principal. De este modo la fase 0 corresponde al eclipse principal y si la órbita es circular el eclipse secundario se produce en la fase 0.5, es decir, media órbita después. En fase 1 vuelve a repetirse el eclipse principal. De esta forma, la curva de luz expresada en magnitud versus fase representa cómo varían las binarias eclipsantes en un ciclo orbital. Para apreciar mejor el eclipse principal se acostumbra representar la curva de luz entre fase 0 y fase 2.

Cuando la inclinación del plano orbital respecto al plano del cielo es tal que es próximo a  $90^\circ$ , y las orbitas son circulares, los eclipses serán de tipo total y anular alternadamente. En un eclipse total, la componente más pequeña es completamente ocultada. El brillo total disminuye y el mínimo permanece constante durante el eclipse. Luego, el tránsito de la componente pequeña por el disco de la más grande producirá un eclipse anular con un mínimo constante también. Cuando las inclinaciones son menores a  $90^\circ$ , los eclipses se vuelven parciales, y se sucederán tránsitos y ocultaciones parciales. En un eclipse parcial, ya que el brillo cambia gradualmente a lo largo del eclipse y los mínimos dejan de ser constantes.

Si consideramos estrellas esféricas de radios  $R_1$  y  $R_2$ , la condición para que se produzca un eclipse, para una dada inclinación orbital, es:

$$\sin(90^\circ - i) \leq \frac{(R_1 + R_2)}{a} \quad (2.16)$$

donde  $i$  es el ángulo entre el plano orbital y el plano del cielo y  $a$  es el semieje mayor de la órbita.

La duración del mínimo depende del cociente entre el radio estelar y el tamaño de la órbita. Si además la estrella es una binaria espectroscópica se pueden obtener las

dimensiones verdaderas de la órbita sin necesidad de conocer la distancia al sistema. Como la inclinación es conocida, se pueden determinar unívocamente las masas mediante las expresiones (2.5) y (2.13) y además parámetros fundamentales como radios, temperaturas efectivas, etc.

Las dos componentes de un sistema eclipsante suelen estar mucho más próximas entre sí que en el caso de las binarias visuales. La presencia de una compañera próxima modifica el campo gravitatorio de ambas, pudiendo alterar su forma (efecto de marea). Esta alteración es responsable naturalmente de la pérdida de la simetría esférica del sistema y depende de la estructura interna de las componentes. Las dos estrellas se pueden distorsionar también por efecto de la rotación que tiende a achatrarlas en el polo. Desde el punto de vista teórico es posible en principio describir tales distorsiones en función de la estructura interna de las estrellas. La órbita de este par de estrellas no será kepleriana puesto que los elementos orbitales serán función del tiempo.

La utilidad de representar la curva de luz de un sistema binario eclipsante es que de su observación pueden deducirse ciertas características del sistema. Por ejemplo, al observar la forma de los mínimos podemos saber si se trata de un eclipse parcial o total. Otros fenómenos pueden ser estudiados con algún detalle solamente observando la curva de luz en los sistemas binarios eclipsantes. Este es el caso del parámetro llamado oscurecimiento del limbo que se observa bastante bien en el Sol. Este parámetro afecta la curva de luz de manera que los cambios de flujo observados en la curva no son violentos, son más lentos y tienden a suavizar los mínimos. Utilizando modelos de atmósferas estelares es posible obtener los valores teóricos de los coeficientes de oscurecimiento del limbo y consecuentemente, compararlos con las observaciones. Otro de los efectos que pueden aparecer debido a la proximidad de las componentes es el efecto de reflexión o de irradiación mutua, en el cual las regiones de las estrellas que están alineadas y próximas entre sí se calientan mutuamente, haciendo que estas regiones se encuentren más brillantes. Esto afecta la curva de luz haciendo que cerca del mínimo secundario aumente el flujo luminoso. En los sistemas con transferencia de masa, el material que cae sobre una de las componentes también cambiará la temperatura de la superficie, produciendo regiones más brillantes, modificando la curva de luz.

En los sistemas con órbitas excéntricas, suele ocurrir un desplazamiento de las separaciones relativas entre los eclipses.



Las binarias eclipsantes son un tipo de estrellas variables, tanto las binarias fotométricas como las espectroscópicas pueden ser binarias eclipsantes.

Las binarias eclipsantes se clasifican en tres tipos diferentes, de acuerdo a la variabilidad de sus curvas de luz: *Algol(EA)*,  *$\beta$ Lyrae(EB)* y *WUrsaeMajoris(EW)*. Esta designación es la adoptada por el “General Catalog of Variable Stars” (GCVS)[23].

### **Eclipsantes tipo Algol (EA)**

Deben su nombre a la estrella Algol ( o también llamada  *$\beta$  Persei*), considerada como prototipo de estas variables. Sus componentes son esféricas o levemente elipsoidales. Es posible determinar, de sus curvas de luz, el momento en que comienzan o finalizan los eclipses. Entre los eclipses, la luz permanece casi constante o varía de manera insignificante debido a efectos de reflexión, a componentes levemente elipsoidales, o a variaciones físicas. Los eclipses son de profundidad diferente, incluso el mínimo secundario puede estar ausente.

Se observa un rango extremadamente amplio de periodos, desde 0.2 días hasta más de 10000 días. Las amplitudes de la curva de luz son también bastante diferentes, desde centésimas de magnitud hasta varias de magnitudes (figura 2.7). Entre las EA se pueden encontrar binarias de estados evolutivos muy diferentes, por ejemplo:

- Binarias que contienen dos estrellas de secuencia principal de cualquier tipo espectral de O a M.
- Binarias en las cuales una o ambas componentes han evolucionado, pero no lo suficiente como para entrar en contacto.
- Binarias con una estrella no evolucionada y la otra transfiriendo masa por ejemplo Algol.
- Binarias con una estrella altamente evolucionada (una subenana caliente o una enana blanca) y la otra menos evolucionada.
- Binarias aun no evolucionadas.

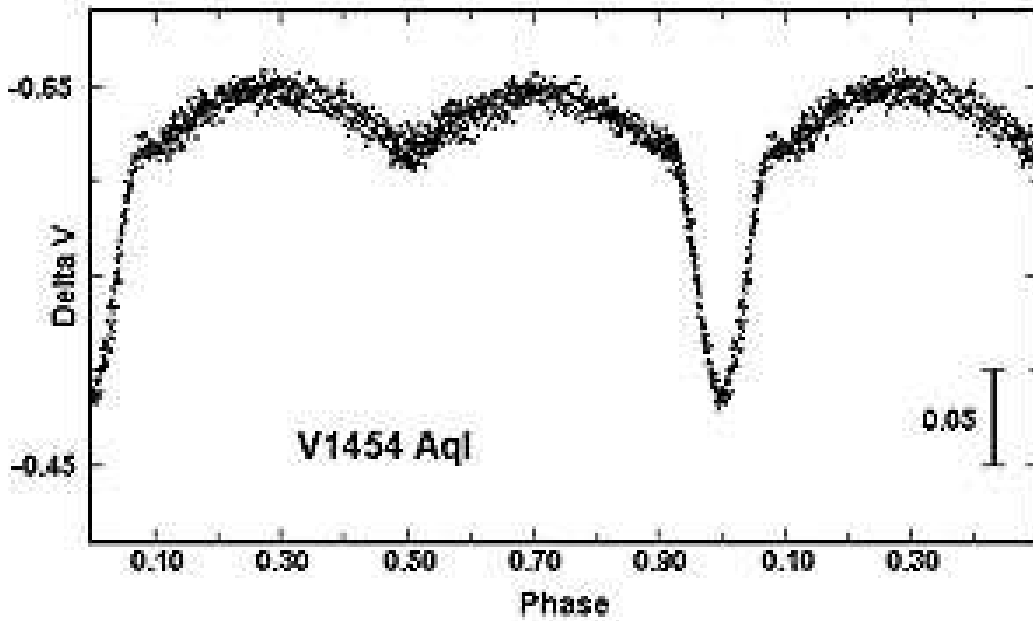


Figura 2.7: Curva de luz de estrella Algol[16]. Véase la gran diferencia de profundidad en los eclipses estelares en fase 0 y fase 0.5 aproximadamente. Fuera de los eclipses la magnitud es casi constante.

### Eclipsantes tipo $\beta$ Lyrae (EB)

Deben su nombre a la estrella prototipo  $\beta$  Lyrae. En este tipo de binarias la magnitud total observada varía continuamente y de sus curvas de luz no se pueden precisar bien el instante exacto de comienzo y fin de los eclipses, debido a los continuos cambios de brillo aparente combinado del sistema, aún fuera de los eclipses. El mínimo secundario se observa en todos los casos y su profundidad es habitualmente bastante menor que el mínimo primario. Los periodos son generalmente mayores que un día y las amplitudes de las curvas de luz son usualmente menores que 2 mag en V. En la mayoría de los casos, las componentes pertenecen a tipos espectrales tempranos (B-A, aunque no son raras las F e incluso pueden ser de tipo M)(figura 2.8).

Las estrellas están tan juntas que una de ellas, o ambas, han sido deformadas por efectos de marea y han adoptado formas elipsoidales. Por ello, las variables  $\beta$  Lyrae pueden describirse como variables elipsoidales eclipsantes. Entre las EB pueden encontrarse sistemas con distintos estadios evolutivos, desde sistemas no evolucionados de

secuencia principal, pero con periodos muy cortos, hasta binarias con estrellas altamente evolucionadas. En la binaria  $\beta$  Lyrae, una de las estrellas está permanentemente transfiriendo masa hacia su compañera. Esta transferencia de masa causa características adicionales en la curva de luz.

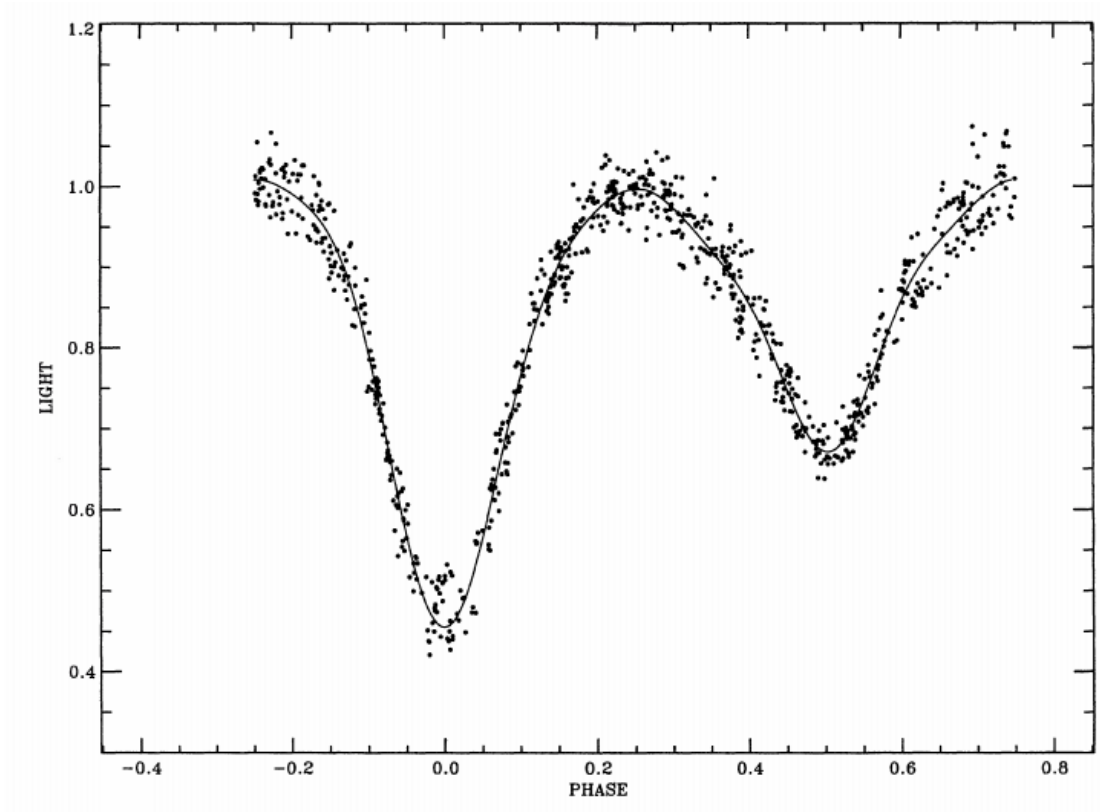


Figura 2.8: Curva de luz de la estrella  $\beta$  Lyrae[42]. Nótese que la magnitud varía en todo momento, incluso fuera de los eclipses.

### Eclipsantes tipo W Ursae Majoris (EW)

Estas son eclipsantes con periodos más cortos que un día, y consisten de componentes elipsoidales casi en contacto. De sus curvas de luz es imposible especificar los instantes de comienzo o finalización de los eclipses, los cuales son muy redondeados. Las profundidades de los mínimos primario y secundario son casi iguales o difieren de forma insignificante. Las amplitudes de luz son generalmente menores que 0.8 mag en V. Las componentes generalmente pertenecen a los tipos espectrales F-G y más tardíos. Las binarias de tipo W UMa son en su mayoría, sistemas binarios cuyas componentes son tan próximas entre sí que llegan a compartir una atmósfera común. Estos sistemas

se llaman sistemas binarios de contacto (figura 2.9).

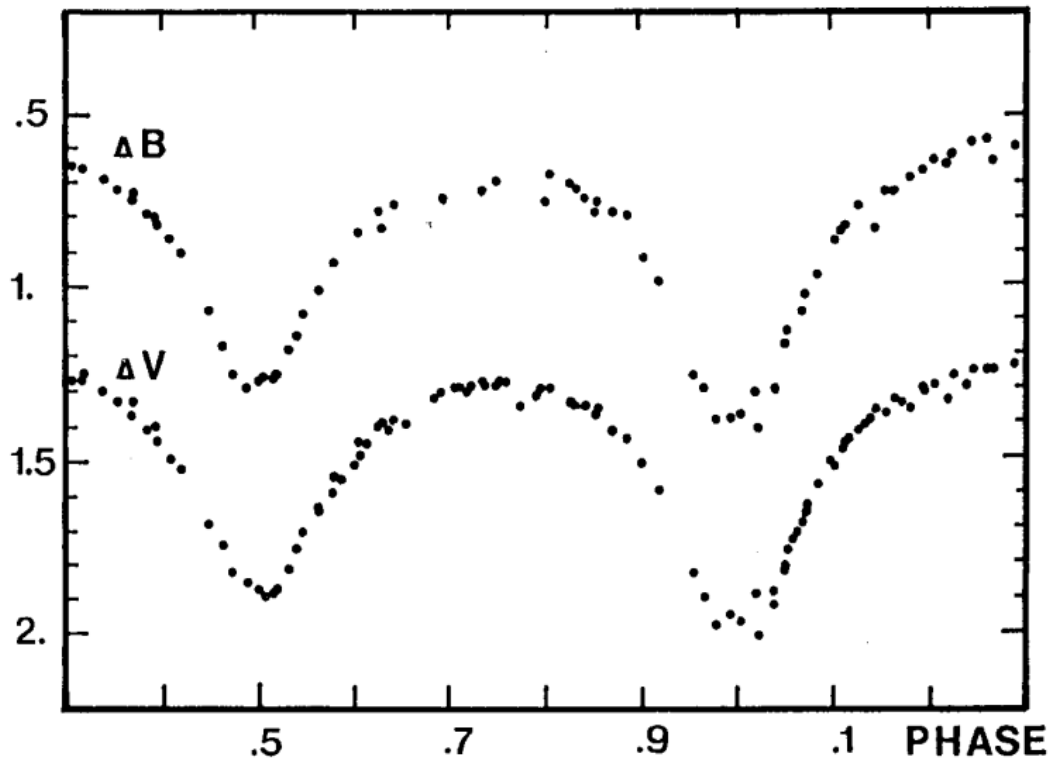


Figura 2.9: Curva de luz de la estrella W Ursae Majoris en magnitud ( $\Delta B$  y  $\Delta V$ )<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup>Representa la diferencia de magnitud en los filtros B y V de la binaria eclipsante con otra estrella de referencia llamada estrella de comparación.

# Capítulo 3

## FUENTES DE DATOS UTILIZADOS

Se utilizaron los datos correspondientes a 2 proyectos de observación que explicamos a continuación.

### 3.1. OGLE

El Experimento de Lente Gravitacional Óptico (OGLE [29]) es un proyecto astronómico creado para descubrir materia oscura usando la técnica de microlente gravitacional. Esta técnica consiste en observar continua y sistemáticamente diferentes regiones del cielo donde podrían producirse los microlentes. Los microlentes tienen una alta probabilidad de producirse en las galaxias Nube Mayor y Nube Menor de Magallanes y el bulbo de nuestra Galaxia, por su gran número de estrellas en esas regiones. Como resultado de usar esta técnica, además de observar los microlentes, se obtuvieron datos de la variación del flujo luminoso de estrellas variables (estrellas pulsantes y sistemas binarios eclipsantes). El proyecto OGLE, en su primer período de funcionamiento realizó algunas observaciones como prueba; pero ya en el segundo período (llamado OGLE II), de mediciones realizadas solamente en la dirección del bulbo Galáctico desde el Observatorio Las Campanas, Chile durante los años 1997-1999 se obtuvieron datos de 200000 estrellas variables. La región del cielo medida por OGLE fue dividida en 49 campos y sus resultados están contenidos en un catálogo con información de cada cam-

po del cielo, posición de las estrellas en ese campo, tiempo de observación y variación de magnitud estelar en filtro I. Toda la información obtenida en este catálogo se encuentra disponible en ([ftp://bulge.princeton.edu/ogle/ogle2/bulge\\_dia\\_variables](ftp://bulge.princeton.edu/ogle/ogle2/bulge_dia_variables))[12].

## 3.2. MACHO

La colaboración de Objetos Compactos Masivos del Halo (colaboración MACHO: Popowski et al(2005)[33], por sus siglas en inglés) es un proyecto hecho para probar que una significativa fracción de materia oscura en el halo de la Vía Láctea está compuesta de enanas marrones o planetas. Para ello han observado durante varios años a la galaxia Nube Mayor de Magallanes y al bulbo de nuestra Galaxia, desde el Observatorio Mount Stromlo en Australia, desde el año 1992 hasta 1999. Al igual que el catálogo OGLE, los resultados de sus observaciones consisten en información de la posición de las estrellas medidas y variación del flujo luminoso dos filtros R y V. La región del bulbo Galáctico observada fue dividida en 94 campos y los objetos medidos contienen a las estrellas variables. La información se encuentra disponible en (<http://macho.nci.org.au/>)[17].

# Capítulo 4

## METODOLOGÍA

El proyecto consiste en usar los datos de OGLE II de estrellas variables en dirección del bulbo de nuestra Galaxia con la finalidad de separar de ellas las estrellas binarias eclipsantes. Nuestro trabajo consiste en desarrollar un procedimiento para seleccionar este tipo de estrellas variables del catálogo OGLE II y encontrar sus contrapartidas en el catálogo MACHO.

Como primer paso debemos seleccionar las binarias eclipsantes del catálogo OGLE II. A continuación, buscaremos estos mismos objetos en el catálogo MACHO basándonos en que aquellos objetos contenidos en ambos catálogos deben tener igual periodo orbital. Como resultado esperamos generar nuestro propio catálogo de binarias eclipsantes con curvas de luz en tres filtros I, V y R.

En la figura 4.1 presentamos un esquema del procedimiento a seguir para obtener las contrapartidas MACHO de una estrellas binaria eclipsante OGLE II. En detalle, el procedimiento aplicado consiste en los siguientes pasos:

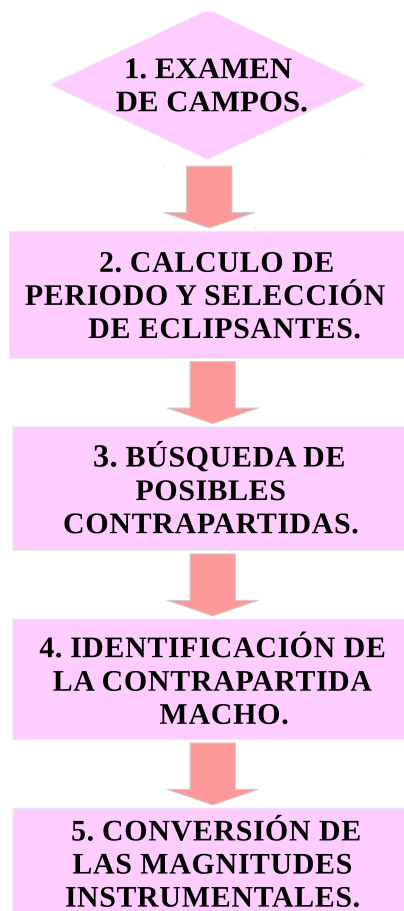


Figura 4.1: Esquema que describe los pasos a seguir para obtener la contrapartida MACHO de una estrella binaria OGLE.

## 4.1. EXAMEN DE CAMPOS

Se examinaron los catálogos de OGLE II y MACHO para determinar qué campos del primer catálogo se intersectan con los campos del segundo catálogo. Por ejemplo, encontramos que el centro del campo 10 de OGLE denominado BUL-SC10 tiene coordenadas ecuatoriales próximas al centro del campo 309 de MACHO. En el cuadro 4.1 aparecen las coordenadas celestes ecuatoriales Ascensión Recta (A.R.) y Declinación (Dec.). Nótese que las coordenadas de ambos campos difieren algo más de un minuto de A.R o en Dec. Esto es un indicio de que ambos campos deberían contener las mismas estrellas.

En el Apéndice A, se muestran las posiciones de los centros de cada campo observado en coordenadas ecuatoriales celestes (Ascensión Recta y Declinación). Los 49 campos



OGLE II se encuentran en el cuadro 6.1 y los 94 campos MACHO están en el cuadro 6.2.

Cuadro 4.1: Coordenadas de los centros de los campos BUL-SC10 de OGLE y 309 de MACHO.

Catalogue Field		A.R. (h m s)	Dec. (° ' ")
OGLE II	BUL-SC10	18:20:06.6	-22:23:03.0
MACHO	309	18:19:01.19	-22:23:43.5

En el Apéndice B, presentamos el cuadro 6.3 con los centros de los campos comunes de ambos catálogos.

En la figura 4.2 se muestra un gráfico de las áreas ocupadas por cada uno de los campos de la 4.1. El centro de campo está marcado por un (+) (campo 10 de OGLE) o una (x) (campo 309 de MACHO). Vemos que gran parte del campo BUL-SC10 está contenido en el campo 309. Cada campo de OGLE es de  $14' \times 57'$ , mientras que cada campo MACHO es de  $43' \times 43'$ .

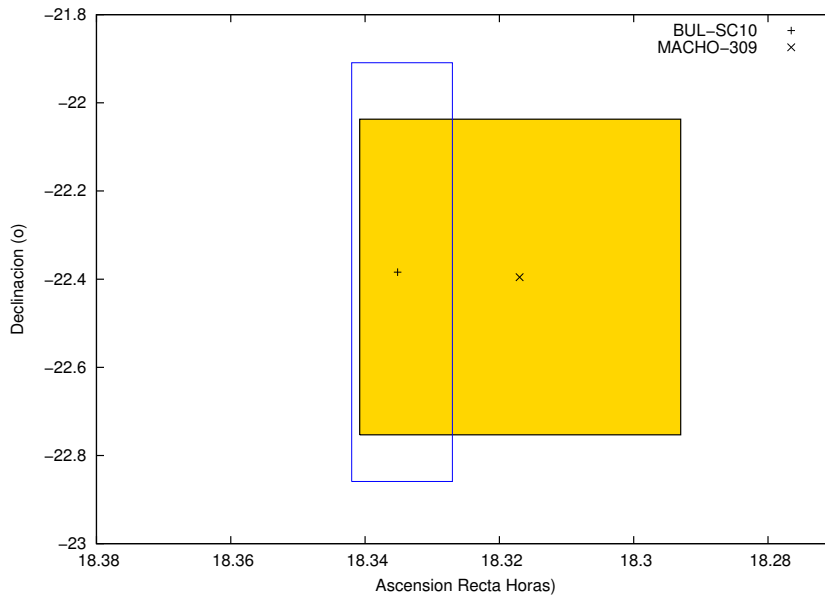


Figura 4.2: Intersección de los centros de los campos BUL-SC10 de OGLE y 309 de MACHO.

De la misma manera en el Apéndice C se presentan los mapas con las intersecciones de todos los campos OGLE II y MACHO.

## 4.2. CÁLCULO DE PERIODO Y SELECCIÓN DE ECLIPSANTES

Con ayuda de un script en el programa Iraf calculamos los periodos de las estrellas variables del catálogo OGLE II que contiene 200000 objetos. Para ello el script usa el método String-Length <sup>1</sup> [11]. El script, además calcula la curva de luz para cada variable periódica OGLE II. Observamos que del total de estrellas variables, un porcentaje pequeño son variables periódicas: por ejemplo del campo 2 de 5279 variables solo 583 era periódicas(11 %) mientras que en el campo 12 de 3476 variables solo 315 eran periódicas(9 %). Habiendo obtenido las curvas de luz, separamos manualmente aquellas que son binarias eclipsantes según la forma de la curva de luz. Por ejemplo, en las figuras 4.3 y 4.4 se muestran algunas curvas de luz de binarias eclipsantes del campo BUL-SC10 con sus periodos orbitales (en días) y la época de su eclipse principal. De todas las curvas de luz que hemos obtenido para el campo 10 de OGLE II, seleccionamos las que corresponden a sistemas binarios eclipsantes, que son los objetos de estudio de este trabajo.

Nótese en estas gráficas que el eje horizontal se denomina fase y, por convención, en los sistemas binarios eclipsantes la fase es 0 en el eclipse más profundo o eclipse principal. Cuando la fase es 1 significa que el sistema ha dado 1 órbita completa. El eclipse menos profundo (generalmente 0.5 en fase) se denomina eclipse secundario. La diferente profundidad de esos mínimos indica que ambas componentes estelares tienen diferente temperatura superficial. Por ejemplo, en la figura 4.3 la binaria 1823 del campo 10 de OGLE II (denominado BUL-SC10-1823) tiene un periodo orbital calculado de  $2.05062 \pm 0.00001$  días y la época fue 1299.80019 en días julianos heliocéntrico modificado (DJHM).

---

<sup>1</sup>El método string-length, es un método que se realiza para establecer el período de una estrella variable a partir de un número relativamente pequeño de observaciones medidas espaciadas al azar durante un largo período de tiempo.

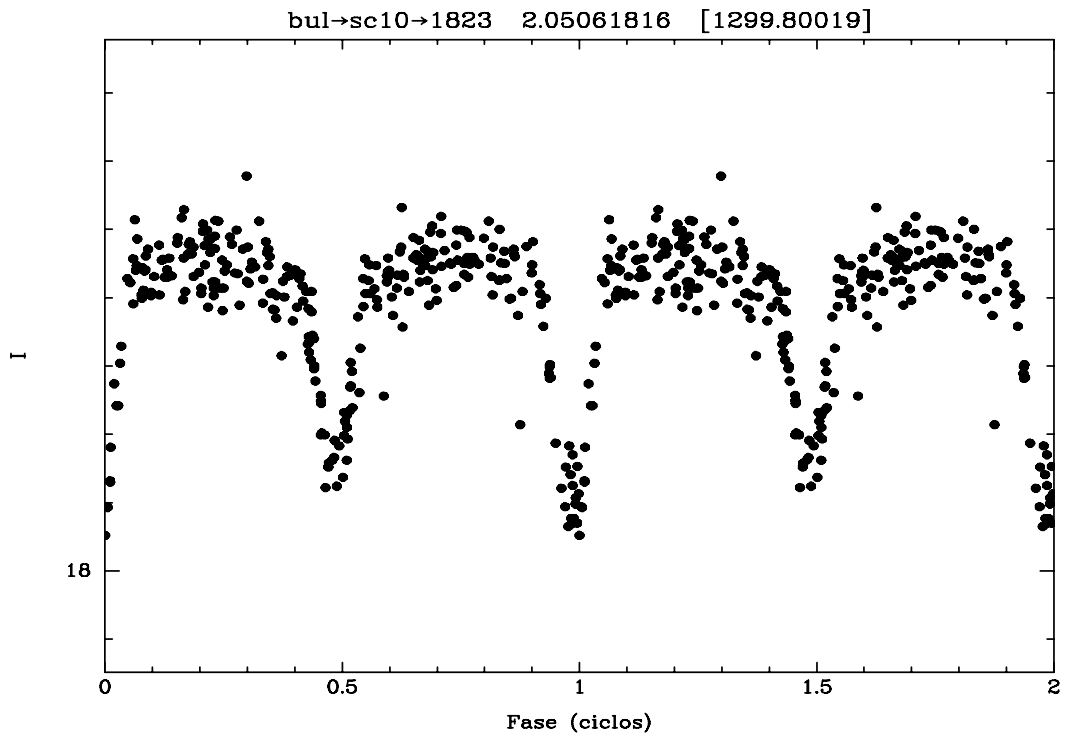


Figura 4.3: Curva de luz de la binaria eclipsante OGLE BUL-SC10-1823.

En la figura 4.4 se tiene la binaria eclipsante OGLE II BUL-SC10-1847 cuya diferencia entre los eclipses no es tan acentuada lo que indica que la temperatura de las componentes no es muy diferente.

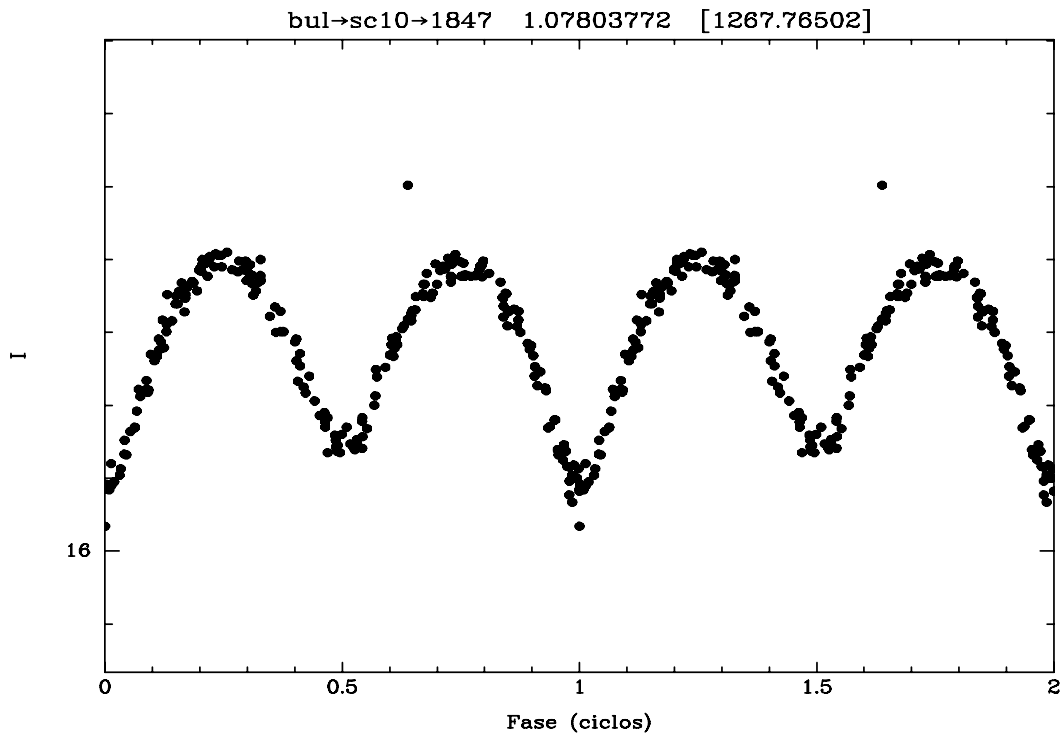


Figura 4.4: Curva de luz de la binaria eclipsante OGLE BUL-SC10-1847.

Las figuras 4.5 y 4.6 corresponden a estrellas pulsantes. Su forma parecida a una función diente de sierra es típica de una estrella cuyo volumen varía periódicamente. No se trata aquí de sistemas binarios, sino de estrellas que están en una etapa de su evolución en la cual se expanden y contraen en tiempos relativamente cortos. Por ejemplo, en la figura 4.5 la estrella pulsante OGLE II BUL-SC10-112 cambia de volumen en un periodo de 0.59361 d. Como resultado de esa variación su flujo luminoso también cambia periódicamente y de allí la forma de su curva de luz.

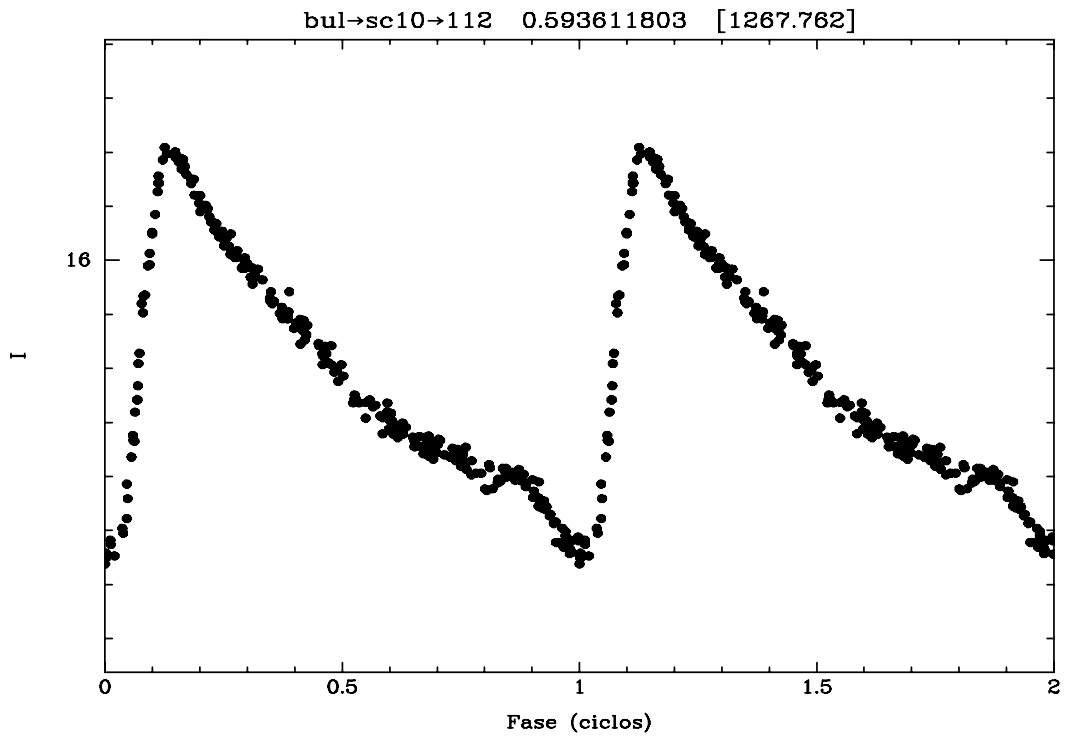


Figura 4.5: Curva de luz de la pulsante OGLE BUL-SC10-112.

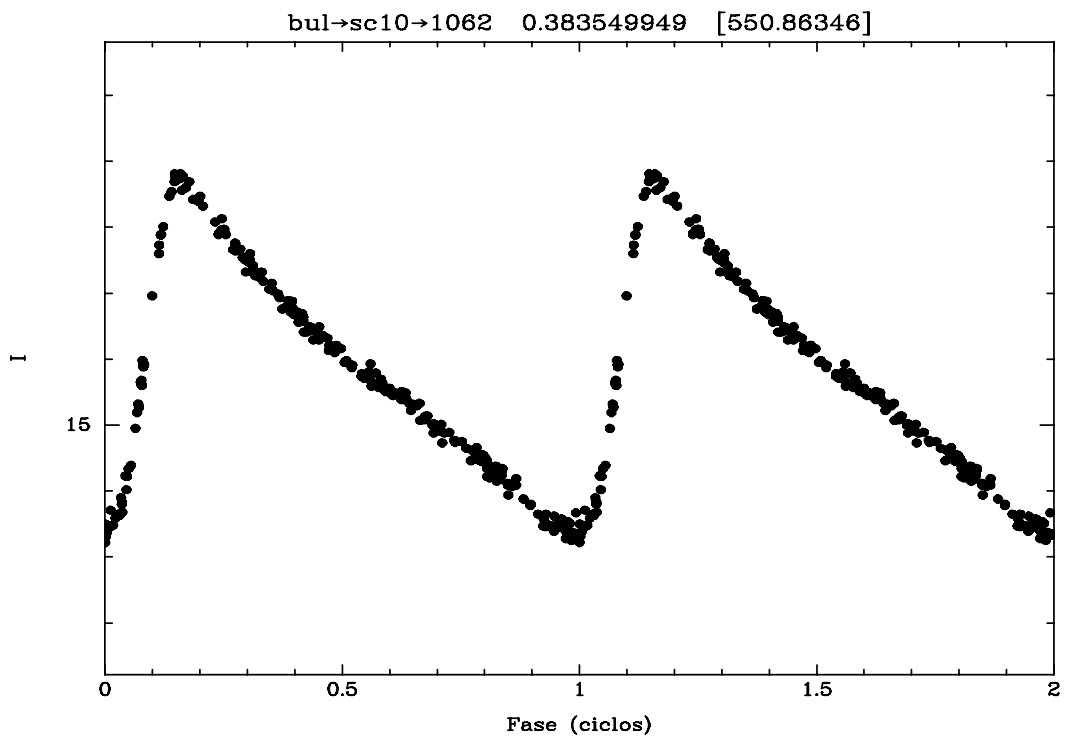


Figura 4.6: Curva de luz de la pulsante OGLE BUL-SC10-1062.

La curva de luz de la figura 4.7 no corresponde ni a un sistema binario, ni a una estrella pulsante. Su forma es típica de un microlente que pudo haber sido medido por el telescopio de OGLE II y se trata de un evento no periódico. Los microlentes se producen esporádicamente cuando una estrella se interpone entre el observador y otra estrella a la cual no esta ligada gravitacionalmente. Esto produce una amplificación de la luz de la estrella de fondo y se dice que la estrella que produce este efecto se comporta como una lente gravitacional o dependiendo de la masa como un microlente.

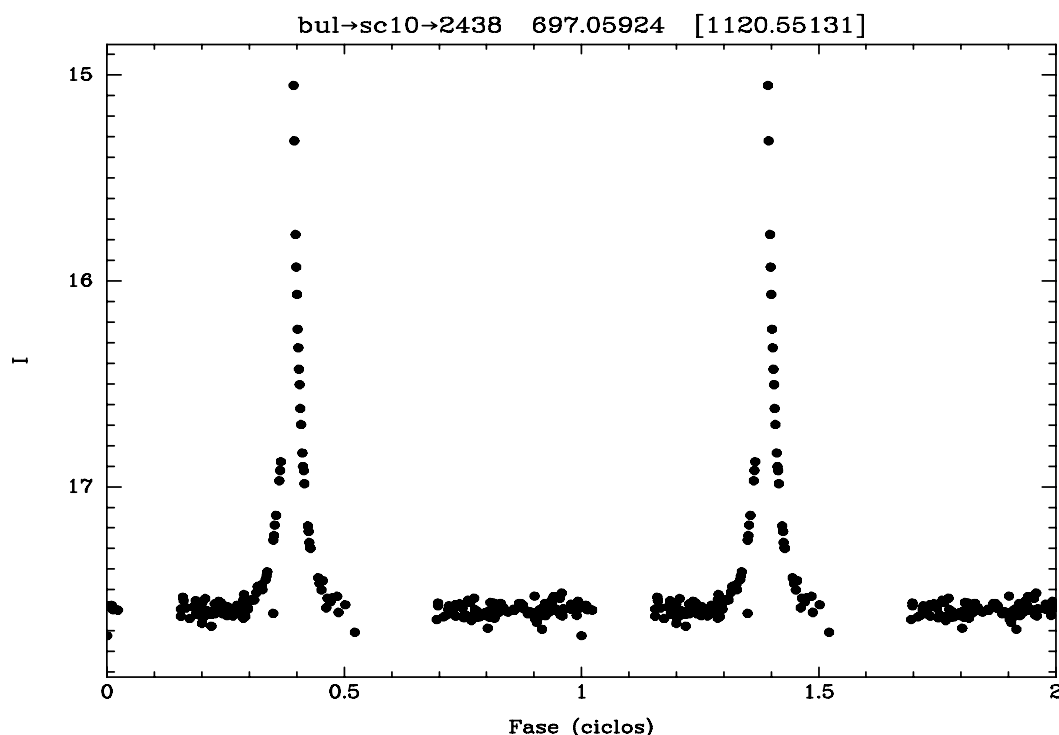


Figura 4.7: Curva de luz de un probable microlente.

La curva de la figura 4.8 tampoco corresponde al de un sistema binario eclipsante y no ha sido identificado como perteneciente a otro tipo de estrella variable. Otras curvas de luz que no muestran parecido al patrón de variación de un sistema binario o al de una estrella pulsante las hemos etiquetado como no definida.

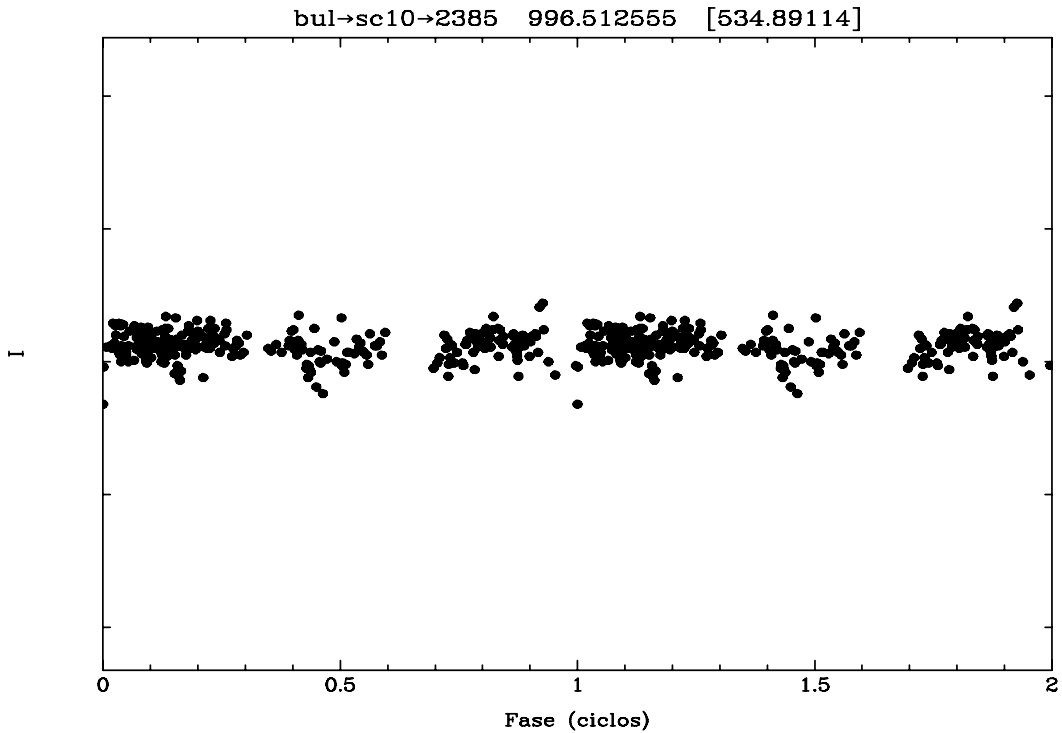


Figura 4.8: Curva de luz de una estrella variable no definida.

Tanto las curvas de luz de estrellas pulsantes y de los objetos no definidos son mostrados aquí para hacer evidente los diferentes tipos de curvas que hemos encontrado, pero no las hemos considerado en nuestro estudio. Al final de esta etapa obtuvimos 8648 binarias eclipsantes OGLE (ver cuadro 5.1).

### 4.3. BÚSQUEDA DE POSIBLES CONTRAPARTIDAS

Con información del catálogo OGLE II de las posiciones de cada binaria eclipsante buscamos las contrapartidas en el catálogo MACHO. Para ello ingresamos la posición de una binaria eclipsante OGLE II en un script de iraf que compara con la posición de los objetos del catálogo MACHO. Por ejemplo, para la binaria BUL-SC45-1218 con periodo orbital  $0.380 \pm 0.016$  d sus coordenadas son:

R.A.: 18h03m19.56s

Dec:  $-30^{\circ}00'32.5''$

En el catálogo MACHO buscamos los objetos con coordenadas próximas a la binaria OGLE II que cumplan la condición:

$$r = \sqrt{(RA_{OGLE} - RA_{MACHO})^2 \cos^2 DEC_{OGLE} + (DEC_{OGLE} - DEC_{MACHO})^2} \quad (4.1)$$

Donde  $r$  es un valor que indica la proximidad de un objeto a otro en el cielo. Para eso escribimos un script en Iraf, que lee un archivo con posición de estrellas del catálogo MACHO de un determinado campo y lo compara con la posición de una binaria eclipsante OGLE II cuyo campo se intersectan con el campo MACHO. El script solo toma en cuenta aquellas posibles contrapartidas que cumplen la condición  $r < 4''$ , este valor es arbitrario, elegido después de hacer varias pruebas.

Antes de referirnos a las contrapartidas en el catálogo MACHO, veamos cómo se designan las estrellas en este catálogo. En la figura 4.9 se muestra cómo se distribuyen los campos del catálogo MACHO los cuales, pueden en algunos casos superponerse. En la figura 4.10 se muestran los TILES [2], que son las regiones en las que se dividió el cielo, los cuales nunca se superponen. Estos detalles son importantes para describir la posición de una estrella en el catálogo MACHO y asignarle una denominación. Por lo tanto, para designar en este catálogo a una estrella, se necesitan 3 parámetros: el campo, el tile y el número de estrella en este tile. A cada estrella así designada le corresponde su posición en Ascensión Recta y Declinación.



# Fields

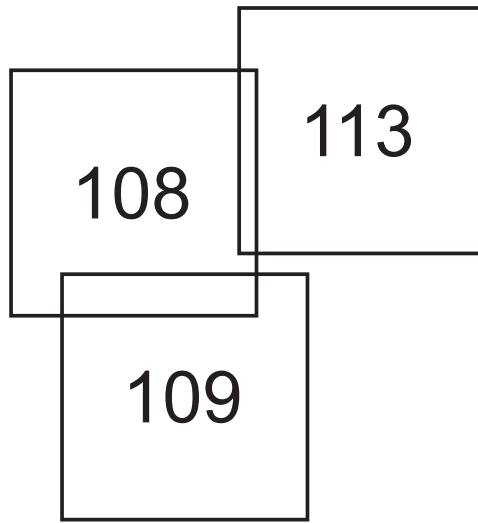


Figura 4.9: Distribución de los campos del catálogo MACHO.

# Tiles

T 1			T 4
	108	113	
	109		
T 25			T 28

Figura 4.10: Distribución de los TILES del catálogo MACHO que contienen los campos de ese catálogo. En este ejemplo se presentan los tiles T1, T2 hasta T28. Los campos 108, 109 y 113 están contenidos en más de un tile.

Como un ejemplo sobre las contrapartidas, el objeto BUL-SC45-1218 se encuentra en el campo 45 de OGLE II y se encontraron 6 posibles contrapartidas (como se ve en la cuadro 4.2) en el campo 119 del catálogo MACHO con un valor de  $r$  comprendido entre:  $0.21'' \leq r \leq 2.95''$ .

En la cuadro 4.2 se indica la denominación de cada objeto MACHO que es una

posible contrapartida de la binaria BUL-SC45-1218. La primera columna es la binaria del catálogo OGLE II, la segunda columna es el número del campo de la contrapartida MACHO, la tercera columna es el TILE o región del campo observado, la cuarta columna es el número de estrella dentro del tile, la última columna es el parámetro  $r$ .

Cuadro 4.2: Seis posibles contrapartidas de BUL-SC45-1218 encontradas en el catálogo MACHO ordenadas según su proximidad en el cielo.

OGLE	MACHO			"
	FIELD	TILE	STAR	
BUL-SC45-1218	119	20091	4165	0.21
BUL-SC45-1218	119	20091	4185	1.62
BUL-SC45-1218	119	20091	4663	2.90
BUL-SC45-1218	119	20091	5703	1.90
BUL-SC45-1218	119	20091	6007	2.86
BUL-SC45-1218	119	20091	6035	2.95

## 4.4. IDENTIFICACIÓN DE LA CONTRAPARTIDA MACHO

Habiendo hecho una selección de posibles contrapartidas MACHO, aquí identificamos cuál de ellas corresponde a la binaria eclipsante OGLE II. Para ello, conociendo el periodo según la sección 4.2, calculamos la época y la curva de luz MACHO. Hay que tener en cuenta que la curva de luz en MACHO debe ser igual a la curva de luz eclipsante OGLE II. Del cuadro 4.2 encontramos que la contrapartida de BUL-SC45-1218, era el objeto 119-20091-4165. En la figura 4.11 se muestra la curva de luz de la binaria OGLE II BUL-SC45-1218. En las figuras 4.12 y 4.13 se muestran las curvas de luz de su contrapartida que es el objeto 119-20091-4165 del catálogo MACHO en filtros  $r$  y  $b$  respectivamente. Nótese el parecido de las curvas de luz. Las magnitudes  $r$  y  $b$  son instrumentales.

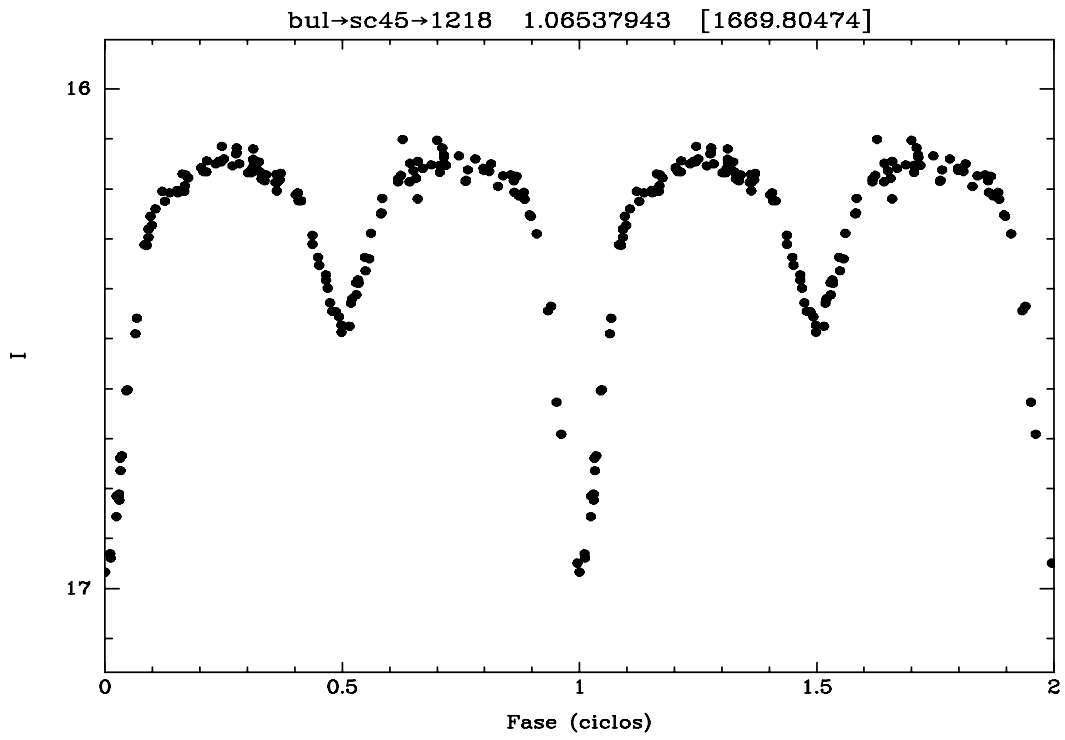


Figura 4.11: Curva de luz OGLE BUL-SC45-1218 con periodo 0.1.06538d.

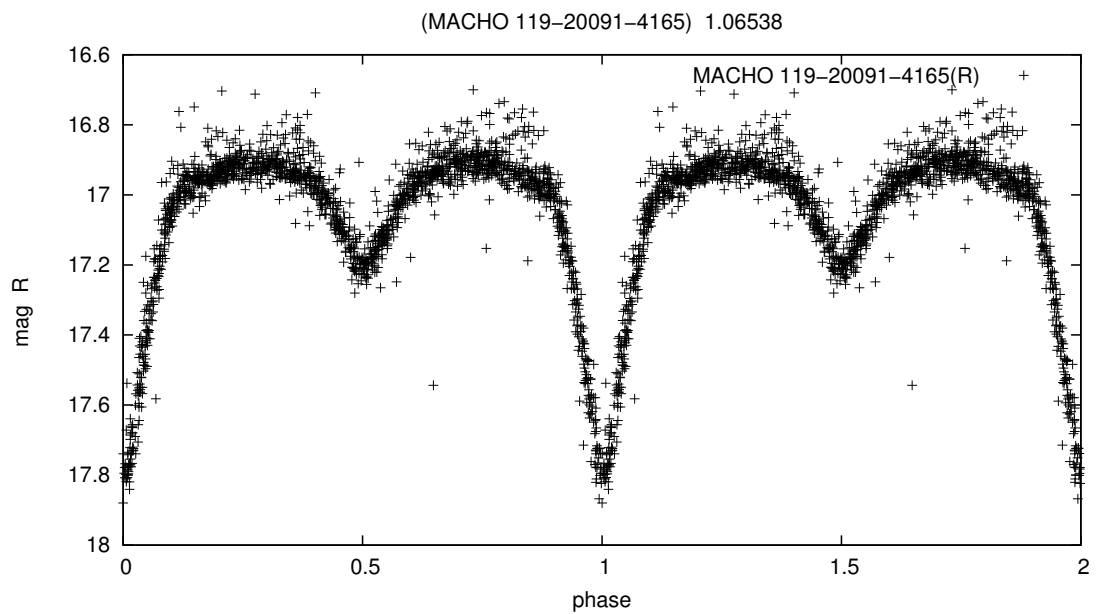


Figura 4.12: Curva de luz del objeto MACHO 119-20091-4165 en filtro r.

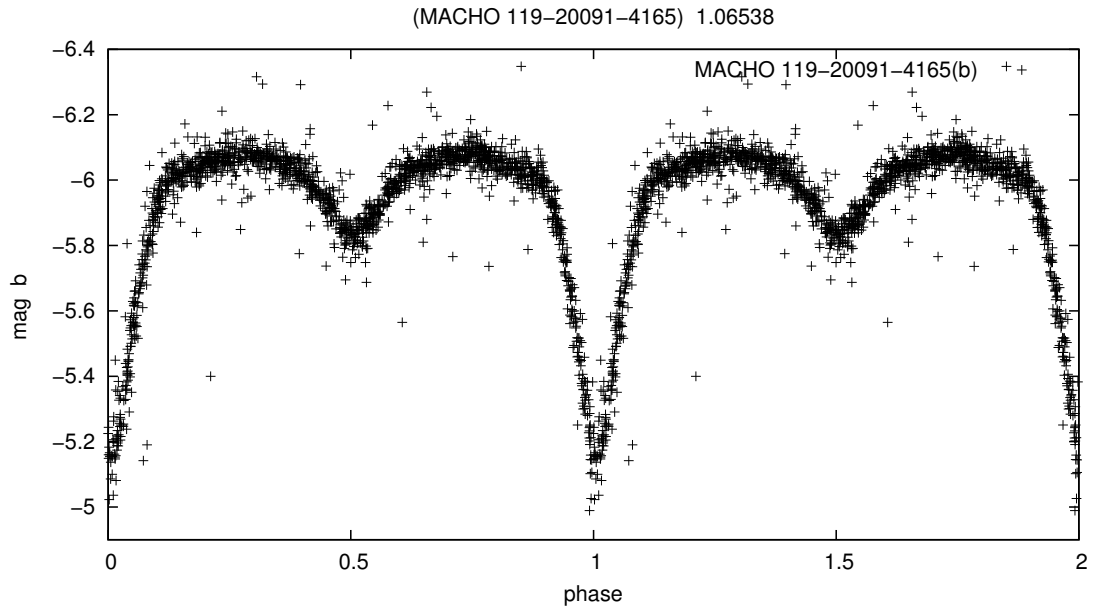


Figura 4.13: Curva de luz del objeto MACHO 119-20091-4165 en filtro b.

## 4.5. CONVERSIÓN DE LAS MAGNITUDES INSTRUMENTALES A ESTÁNDAR

Las magnitudes instrumentales  $r$  y  $b$  en MACHO de las contrapartidas fueron convertidas a magnitudes  $V$  Johnson y  $R$  Kron-Cousin [25] con las siguientes ecuaciones:

$$R = 23,41 + (0,18 * b) + (0,82 * r) \quad (4.2)$$

$$V = 23,7 + (0,82 * b) + (0,18 * r) \quad (4.3)$$

En la figura 4.14 y 4.15 se muestran las curvas de luz del objeto 119-20091-4165 del catálogo MACHO luego de haber sido convertidas las magnitudes  $r$  y  $b$  a filtros  $R$  y  $V$  respectivamente.

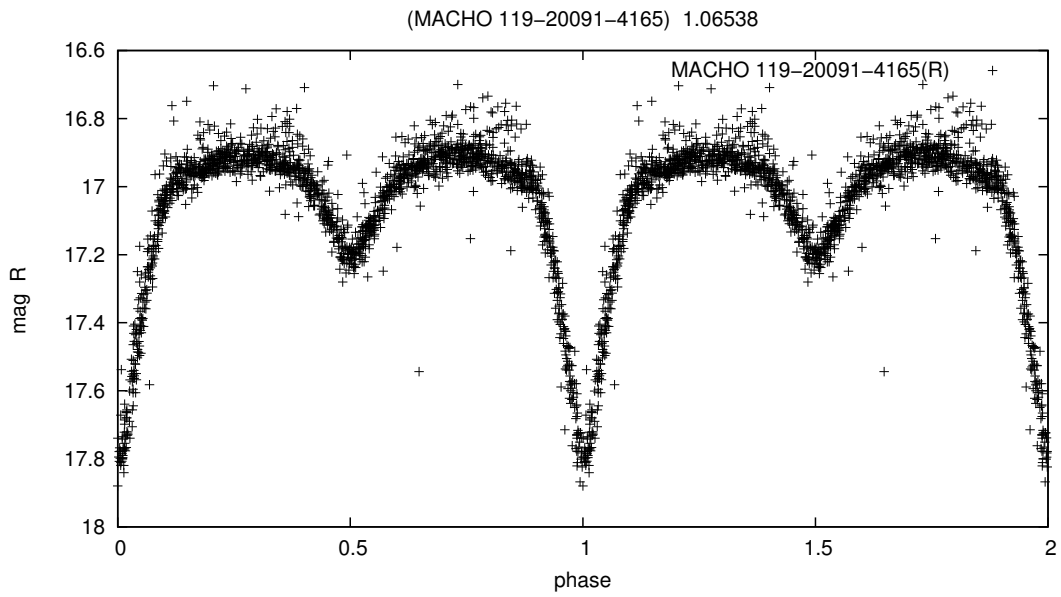


Figura 4.14: Curva de luz del objeto MACHO 309-38255-747 en filtro R.

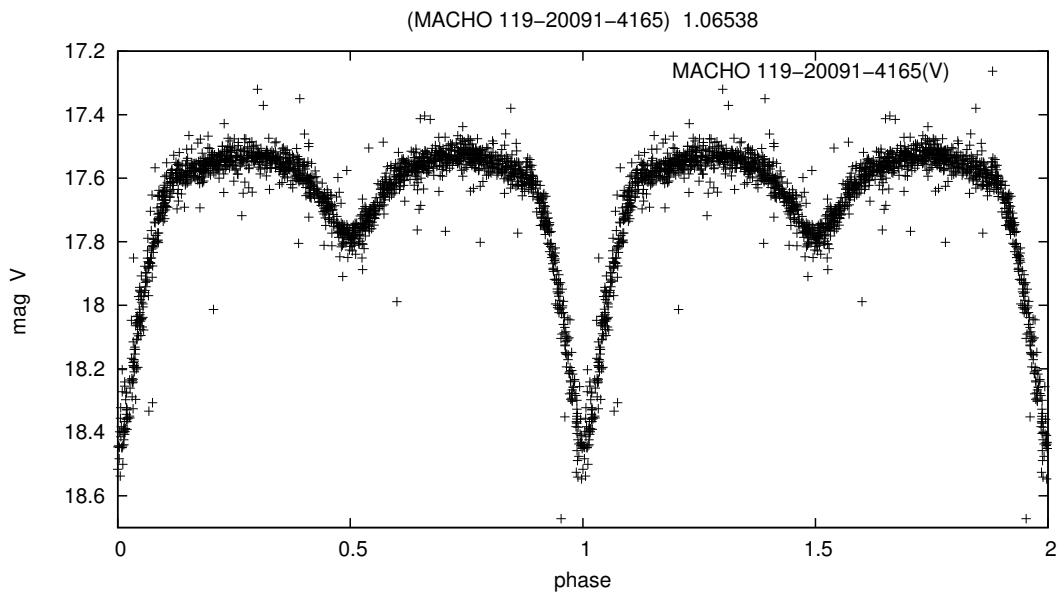


Figura 4.15: Curva de luz del objeto MACHO 309-38255-747 en filtro V.

En algunos casos, solo se tenía información en un solo filtro. Para esos casos no se aplica esta conversión ya que como se ve en las ecuaciones (4.2) y (4.3) se necesita información en ambos filtros. De esta forma encontramos las contrapartidas de cada una de las binarias eclipsantes OGLE.

# Capítulo 5

## RESULTADOS

A continuación, en el cuadro 5.1 mostramos los resultados globales obtenidos de nuestra selección de binarias. La columna 1, CAMPO, dividida en 2 columnas (OGLE y MACHO), se refiere a qué catálogo corresponden las estrellas variables. La columna 2, ESTRELLAS VARIABLES, indica el número de estrellas variables, según el catálogo respectivo. La columna 3, VARIABLES PERIÓDICAS OGLE, se refiere al número de variables periódicas encontradas en cada campo OGLE. La columna 4, BINARIAS ECLIPSANTES, muestra el número de estos objetos encontrados en cada campo OGLE. La columna 5, CONTRAPARTIDAS, indica cuántas de las binarias contenidas en la columna 4 tienen sus contrapartidas en MACHO.

Del cuadro 5.1 vemos que el número de binarias eclipsantes de OGLE II representa aproximadamente 6.2% del total de estrellas variables detectadas por OGLE II y MACHO. Esto se debe a que en cada campo un reducido número de variables eran periódicas (estrellas pulsantes, binarias eclipsantes y otros objetos no identificados). Este bajo porcentaje puede deberse a que el proyecto de observación OGLE II fue de 3 años y varios objetos pudieron no ser examinados exhaustivamente. Eso contrasta con la duración del proyecto MACHO (6 años).

Es necesario indicar que muchas de las variables OGLE II que obtuvimos no pudimos identificarlas con exactitud como variables eclipsantes a partir de sus curvas de luz, siendo muchos de ellos variables elipsoidales.

Vemos por ejemplo que el número de binarias en el campo 2 de OGLE se ha reducido a 160 contrapartidas en MACHO (se ha reducido en 251), mientras que en el campo 10

Cuadro 5.1: Resultados globales obtenidos de nuestra selección de binarias.

CAMPO		ESTRELLAS		VARIABLES	BINARIAS	CONTRA
OGLE	MACHO	VARIABLES		PERIÓDICAS	ECLIPSANTES	PARTIDAS
		OGLE	MACHO	OGLE	OGLE	MACHO-OGLE
BUL-SC1	MACHO-119	4597	744631	734	344	245
BUL-SC2	MACHO-109	5279	692951	583	411	160
BUL-SC2	MACHO-114	5279	666289	583	411	235
BUL-SC4	MACHO-403	9096	679236	785	337	167
BUL-SC10	MACHO-309	2499	550045	192	129	119
BUL-SC12	MACHO-307	3476	656217	315	251	156
BUL-SC13	MACHO-307	3084	656217	316	246	172
BUL-SC16	MACHO-178	4802	818438	407	262	177
BUL-SC17	MACHO-178	4690	818438	401	265	174
BUL-SC18	MACHO-101	5805	628396	702	522	370
BUL-SC20	MACHO-113	5910	625303	726	428	340
BUL-SC21	MACHO-113	7449	625303	680	441	314
BUL-SC30	MACHO-113	6893	625303	774	496	350
BUL-SC31	MACHO-108	4789	649432	570	282	166
BUL-SC31	MACHO-109	4789	692951	570	282	148
BUL-SC32	MACHO-109	5007	692951	593	380	243
BUL-SC33	MACHO-128	4590	615727	564	324	127
BUL-SC34	MACHO-402	7953	709606	682	344	181
BUL-SC35	MACHO-104	5169	581053	581	336	217
BUL-SC36	MACHO-104	8805	581053	537	407	211
BUL-SC36	MACHO-105	8805	637102	537	407	145
BUL-SC38	MACHO-118	5072	635250	556	360	90
BUL-SC38	MACHO-119	5072	744631	556	360	298
BUL-SC39	MACHO-403	7338	679236	645	384	297
BUL-SC45	MACHO-119	2262	744631	327	126	89
BUL-SC46	MACHO-119	2057	744631	294	113	80
TOTAL		140567	17495021	14210	8648	5271

de OGLE se obtuvo 119 contrapartidas de MACHO lo cual no es una reducción muy significativa.

Las estrellas variables son de magnitud entre 15 y 20 magnitudes, estrellas en magnitud fuera de ese rango no fueron detectadas. Encontramos que de 140567 de estrellas variables en dirección al bulbo de nuestra Galaxia, 8648 son objetos que podemos asegurar que son binarias eclipsantes según el catálogo OGLE II, para estas eclipsantes obtuvimos las contrapartidas en MACHO que solo fueron 5271 lo cual representa un porcentaje de 3.7% del total de estrellas variables.

Habiendo identificado la contrapartida podremos revisar los parámetros obtenidos. En la cuadro 5.2 se tiene un ejemplo de cómo presentamos nuestros resultados. La columna 1, se refiere al número de estrella binaria del catálogo OGLE. La columna 2, se refiere a la contrapartida MACHO. La columna 3, ÉPOCA, día en que fue observado el eclipse principal. Esta columna se divide en 2 según el catálogo registrado. La columna 4, PERIODO, es el tiempo de observación de la estrella. La columna 5, FILTRO, indica en qué filtro fue observada la binaria (I, R y V). Se ha encontrado que algunos de estos objetos tienen información en solo 2 filtros.

Cuadro 5.2: Parámetros de algunas binarias eclipsantes OGLE y su respectiva contrapartida MACHO.

OGLE	MACHO	ÉPOCA		PERIODO (d)	FILTRO		
		OGLE (DJHM)	MACHO (DJM)		I	R	V
BUL-SC10-1743	309-38255-747	1453.5723	51329.6796	0.38026	✓	✓	✓
BUL-SC13-2847	307-36387-5674	618.75587	51427.4048	1.67167	✓	X	✓
BUL-SC13-1667	307-36549-3348	1020.55796	50596.7058	1.61609	✓	✓	X
BUL-SC16-4409	178-23013-787	687.70097	50601.6645	1.43662	✓	✓	X
BUL-SC35-1854	104-20771-288	1729.76542	49867.8093	1.97612	✓	✓	✓
BUL-SC35-2269	104-20641-555	1776.63665	51330.733	2.17263	✓	✓	✓

✓ = HAY INFORMACION DE LA ESTRELLA EN ESE FILTRO

X = NO HAY INFORMACION DE LA ESTRELLA EN ESE FILTRO

DJHM = DIA JULIANO HELIOCÉNTRICO MODIFICADO, EPOCA OGLE=DJH-2450000.0

DJM = DIA JULIANO MODIFICADO, EPOCA MACHO=DJ-2400000.5



Debido a la enorme cantidad de binarias eclipsantes, hemos seleccionado solo un campo de OGLE II para mostrar las contrapartidas obtenidas y sus curvas de luz respectivamente. En el CD se presenta la información de todas las binarias eclipsantes y sus contrapartidas. También están las curvas de luz de las contrapartidas MACHO en magnitudes R y V.

En el Apéndice D, se presenta un cuadro con información de las 89 binarias eclipsantes del campo 45 de OGLE II con información de las contrapartidas, épocas, periodos y filtros observados. Este cuadro presenta la misma distribución que el ejemplo del cuadro 5.2.

En el Apéndice E, se muestran las 89 curvas de luz de las binarias eclipsantes del campo 45 de OGLE II con los filtros observados por ambos catálogos.

Debemos hacer algunas observaciones sobre algunas curvas de luz: - En algunos casos se muestran solo 2 curvas de luz, debido a que no habían datos del tercer filtro (r ó b). Como se recuerda, de las ecuaciones (4.2) y (4.3), las medidas en ambos filtros son necesarias para hacer la conversión de filtros instrumentales a filtros estándar. Por ejemplo, en la figura 5.1, se tiene la curva de luz de BUL-SC45-1944 en filtro instrumental r y en filtro I.

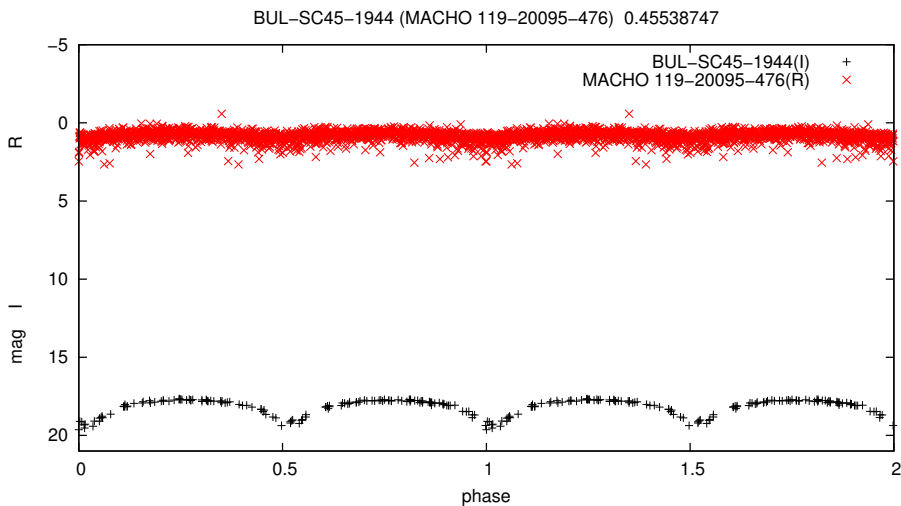


Figura 5.1: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1944 y su contrapartida MACHO 119-20095-476 en filtros I y R.

- En algunas curvas de luz junto con los datos aparecen otros valores que corresponden a errores o ruido durante las mediciones. Por ejemplo, en la figura 5.2 la curva de BUL-SC45-1759 se observa una línea casi horizontal en los filtros R y V, junto con las medidas de la binaria durante el proceso de observación del proyecto MACHO.

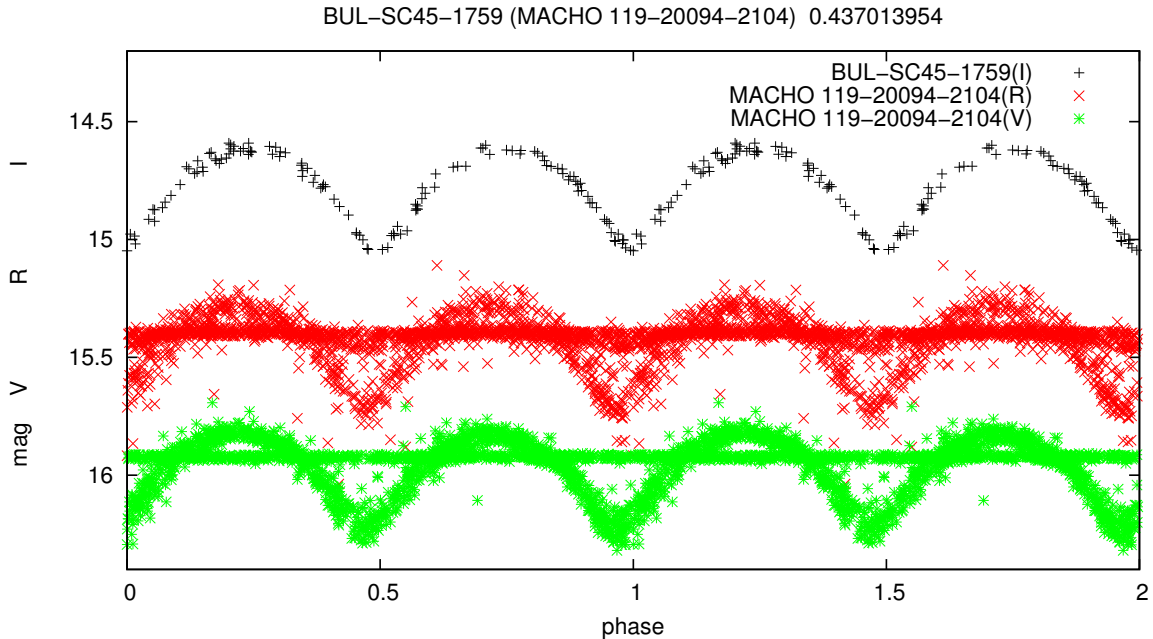


Figura 5.2: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1759 con contrapartida MACHO 119-20094-2104.

Debido a que las estrellas se encuentran en dirección del bulbo de nuestra Galaxia estarán afectadas por absorción del medio interestelar, de modo que presentan enrojecimiento. Esto es evidente en las curvas de luz del campo 45(Apéndice E), donde se observa que su flujo es más intenso en filtro I, salvo en 3 binarias eclipsantes:

- BUL-SC45-501
- BUL-SC45-1474
- BUL-SC45-2177

En las curvas de estas tres binarias el flujo es más intenso en filtro R, lo que indica que estos sistemas son relativamente más calientes que el resto del campo 45. Por ejemplo en la figura 5.3 se tiene la binaria BUL-SC45-1474.

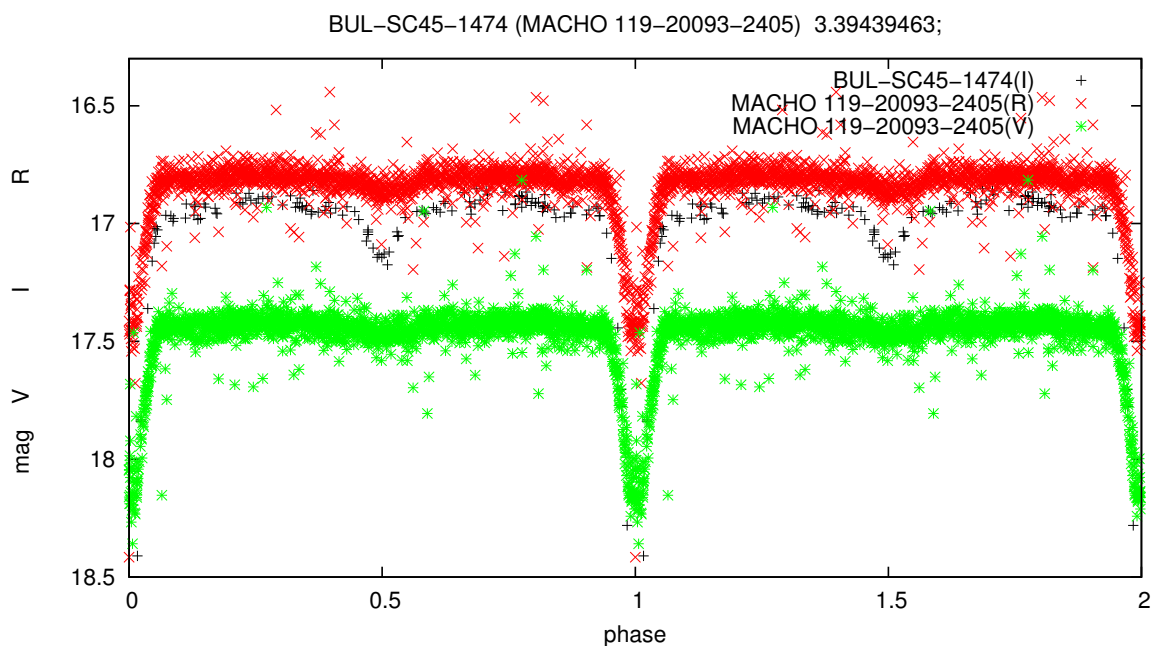


Figura 5.3: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1474 y su contrapartida MACHO 119-20093-2405.

En el campo 45 encontramos varios sistemas binarios con periodos muy diferentes que van desde 0.22 días (5.5 horas) hasta 187 días.

Con respecto a los sistemas de periodo largo, algunas son del orden de decenas y hasta centenas de días. Muchas de estas son binarias elipsoidales, pero existen excepciones como el caso de BUL-SC45-1689 y BUL-SC45-1064 que presentan eclipses cuya duración es una pequeña fracción de su periodo orbital. Por ejemplo, en la figura 5.4 la curva de luz de BUL-SC45-1064 representa un sistema en el cual las componentes están relativamente alejadas entre sí y en la mayor parte de su curva la magnitud permanece constante. Podemos inferir que las componentes tienen una forma esférica. Objetos como este son interesantes para estudiar, porque cada componente evoluciona independientemente del otro. Conociendo los parámetros físicos de las estrellas componentes como masas, radios y temperaturas pueden servir para determinar en qué etapa de su evolución se encuentra y comparar con modelos de evolución estelar.

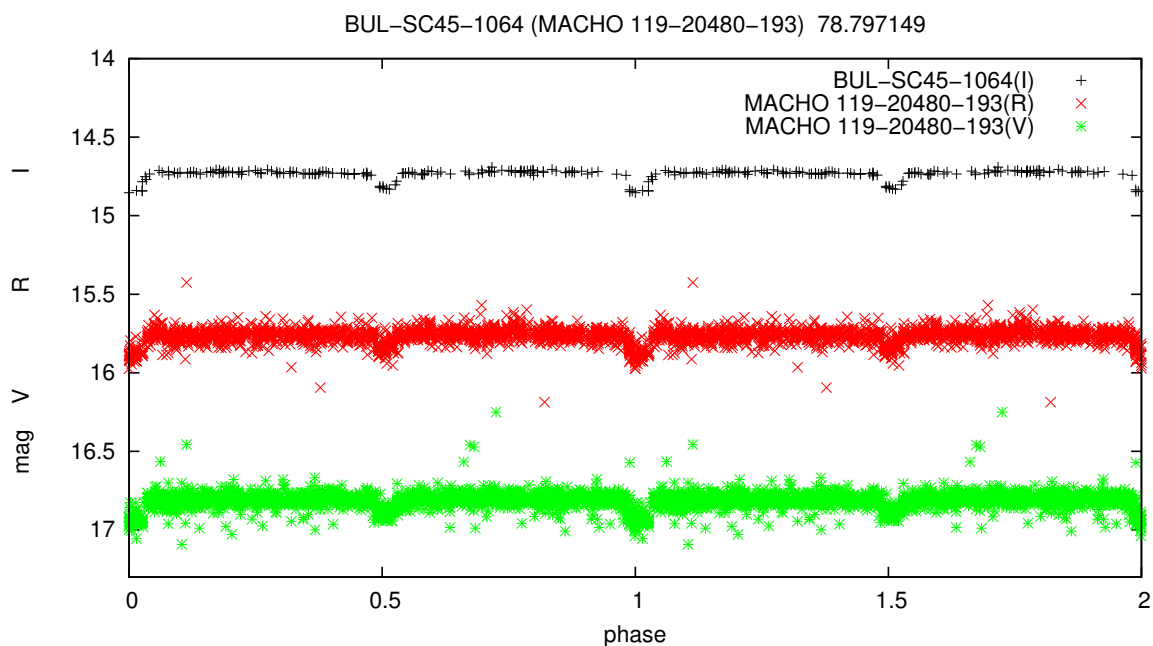


Figura 5.4: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1064 y su contrapartida MACHO 119-20480-193.

Por otro lado, entre las binarias con periodo corto, menores que un día, se encuentran las binarias tipo WUMa. Entre ellas se destacan BUL-SC45-1820 y BUL-SC45-1681 con periodos orbitales menores de 5.8h. Estos sistemas corresponden a binarias cuyas componentes son muy próximas entre sí y son interesantes de estudiar porque conociendo el valor de sus parámetros físicos se puede obtener información de las propiedades atmosféricas de ellos.

Acerca de la forma de las curvas de luz, la mayoría presenta eclipses de tipo parcial, salvo algunos casos como BUL-SC45-1591 y BUL-SC45-1933 que parecen mostrar señales de eclipses totales. En la figura 5.5 se aprecia que en el eclipse principal la profundidad permanece constante.

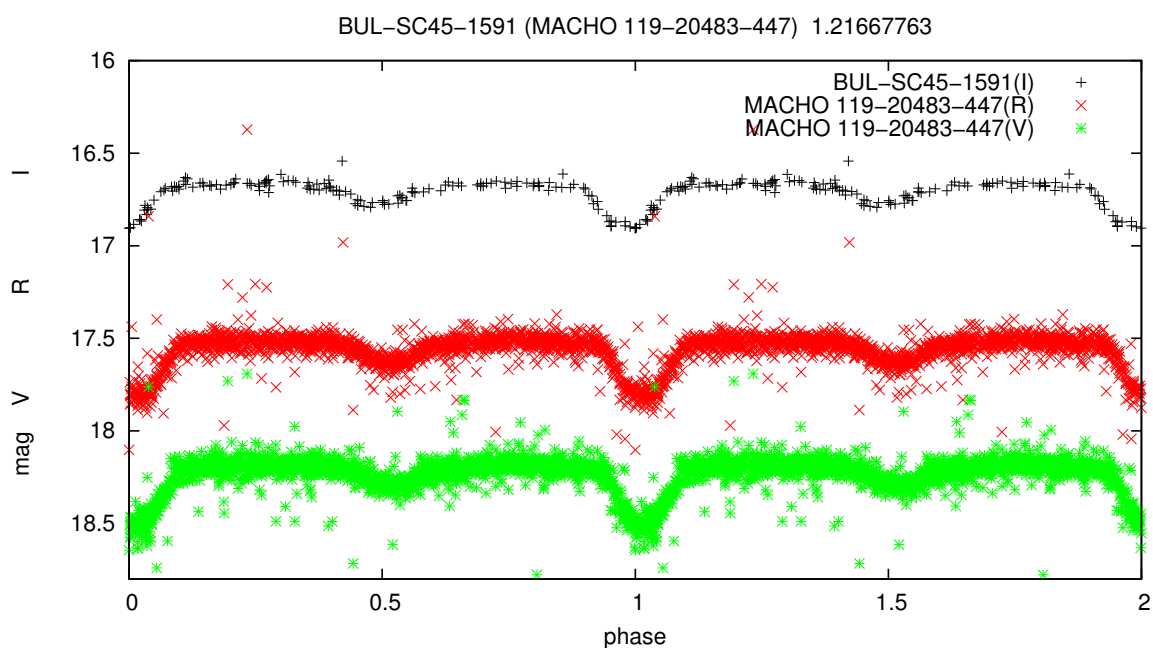


Figura 5.5: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1591 y su contrapartida MACHO 119-20483-447.

Hay que destacar la curva de luz de la binaria eclipsante BUL-SC45-640 que en los filtros R y V de MACHO muestran líneas segmentadas con intervalos de la misma duración. Esto podría interpretarse como errores en la medición, sin embargo en las mediciones de OGLE II aparecen los mismos segmentos pero desfasados con respecto a las otras dos curvas como se muestra en la figura 5.6. Esto significa que son características propias del sistema. Vemos que el periodo es aproximadamente 7 días, lo cual indica que esos intervalos sin medida podría deberse a que los telescopios situados en la superficie terrestre no estuvieron observando todo el tiempo. Ya sea por la temporada de observación o porque el periodo orbital es un múltiplo casi exacto de días. Un examen más minucioso de las curvas de luz y de los tiempos de observación podría darnos una respuesta a este tipo de curva. Otra posibilidad es que algo podría estar interponiéndose durante las mediciones. Podría ser un objeto que rodea a una de las componentes como una mancha sobre su superficie, un exoplaneta, una nube, etc. Las curvas de luz no son suficientes para obtener información de qué produce este comportamiento peculiar.

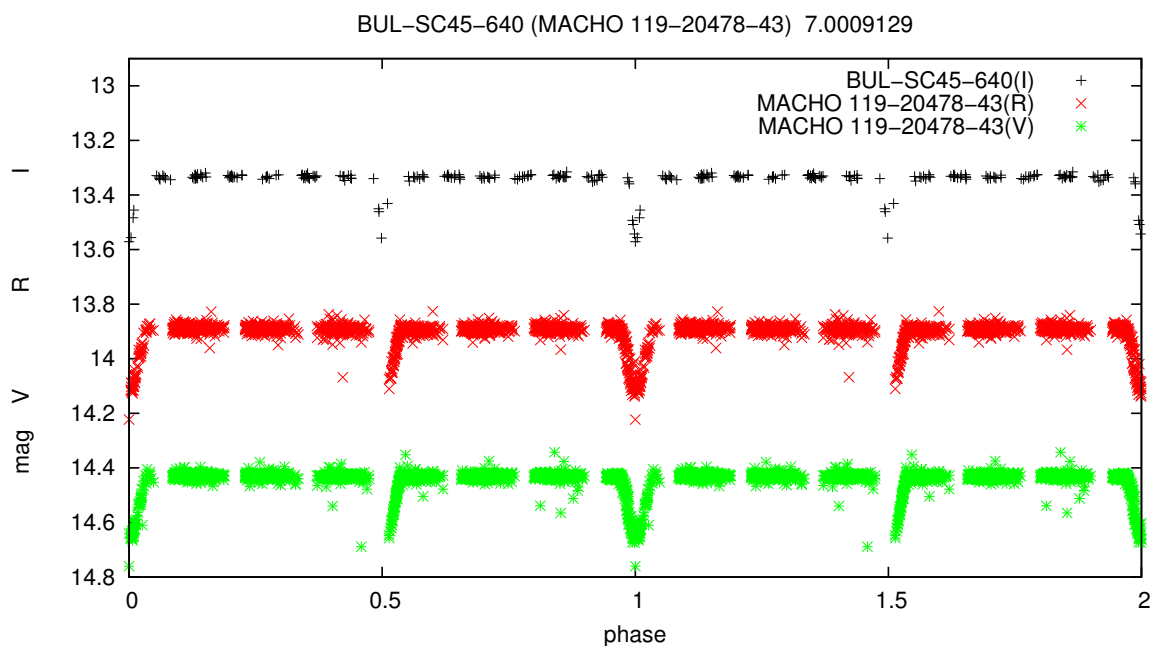


Figura 5.6: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-640 y su contrapartida MACHO 119-20478-43.

Otro objeto que muestra una curva de luz peculiar es BUL-SC45-1899 (figura 5.7) que también presenta interrupciones en su curva de luz en los tres filtros indicando que es una característica del sistema y no se debe a errores en las mediciones. Las interrupciones presentan periodos menores al periodo orbital de la binaria (3.99 días) y aparecen varias veces a lo largo de un ciclo orbital. Una revisión minuciosa de los tiempos de observación podría ayudar a determinar qué está produciendo estas interrupciones.

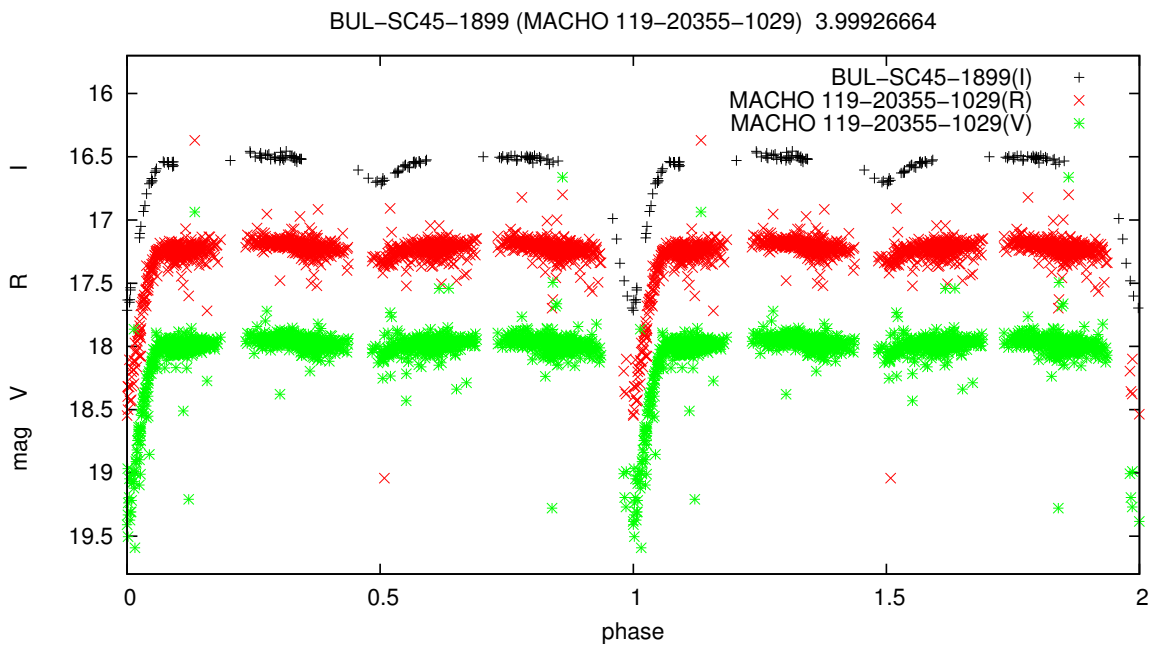


Figura 5.7: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1899 y su contrapartida MACHO 119-20355-1029.

# Capítulo 6

## CONCLUSIONES

Los resultados verifican que nuestro procedimiento fue exitoso para identificar las estrellas binarias eclipsantes de un catálogo y sus contrapartidas en otro.

El número de variables MACHO es más de 100 veces el número de OGLE II, eso se debe a la duración de los proyectos de observación. Creemos que un número mayor de binarias eclipsantes deben estar contenidas en los datos de MACHO pero nuestro procedimiento solo identifica contrapartidas pudiendo haber muchas más binarias eclipsantes que no hemos conseguido identificar.

Nuestro procedimiento es semi-automático. Esto podría ser mejorado en el futuro haciendo que el programa separe automáticamente las variables eclipsantes de aquellas que no lo son. Además el programa debería identificar cuál de las posibles contrapartidas es el objeto que estamos buscando. Esto lo hemos hecho visualmente lo que implicó una gran demanda de tiempo. Automatizar estos procesos mejoraría el rendimiento, evitando que se pudieran cometer algunos errores y economizando el tiempo de operación en la búsqueda de las contrapartidas.

Los diferentes periodos que obtuvimos para las binarias eclipsantes nos revelan que en dirección al bulbo de la Galaxia existen binarias en diferente etapa evolutiva.

Nuestro método de comparar dos catálogos diferentes es beneficioso porque nos permite complementar información en diferentes filtros y además, como ambos catálogos fueron construidos en épocas diferentes nos permite revelar que las características peculiares, en el caso de algunos sistemas, no son resultado de errores en la medición, sino que son características propias del sistema. Eso no sería posible deducir teniendo



información en un solo filtro.

Como resultado de obtener las curvas de luz medidas por OGLE II y MACHO pudimos encontrar sistemas interesantes que pueden ser candidatos para estudios posteriores usando otras técnicas como espectroscopía.

Es necesario indicar que los objetos de este catálogo que hemos obtenido pueden encontrarse también en otros catálogos como por ejemplo 2MASS. Esto ayudará a obtener mayor información de las características de estos sistemas.

Finalmente, el presente trabajo propone con su metodología la posibilidad de poder encontrar contrapartidas para otro tipo de estrellas variables, en base a sus curvas de luz.

# Apéndice A

En este apéndice se muestran las coordenadas celestes ecuatoriales Ascensión Recta (A.R.) y Declinación (Dec.), de los centros de los campos de los catálogos OGLE II y MACHO.

Cuadro 6.1: Coordenadas de los centros de los 49 campos del catálogo OGLE II [43].

Field	A.R. (h m s)	Dec. (° ' ")
BUL-SC1	18:02:32.50	-29:57:41
BUL-SC2	18:04:28.60	-28:52:35
BUL-SC3	17:53:34.40	-29:57:56
BUL-SC4	17:54:35.70	-29:43:41
BUL-SC5	17:50:21.70	-29:56:49
BUL-SC6	18:08:03.70	-32:07:48
BUL-SC7	18:09:05.50	-32:07:10
BUL-SC8	18:23:06.20	-21:47:53
BUL-SC9	18:24:00.00	-21:47:10
BUL-SC10	18:20:06.60	-22:23:03
BUL-SC11	18:21:06.50	-22:23:05
BUL-SC12	18:16:06.30	-23:57:54
BUL-SC13	18:17:02.60	-23:57:44
BUL-SC14	17:47:02.70	-23:07:30
BUL-SC15	17:48:06.90	-23:06:09
BUL-SC16	18:10:06.70	-26:18:05

Field	A.R. (h m s)	Dec. (° ' ")
BUL-SC17	18:11:03.60	-26:12:35
BUL-SC18	18:07:03.50	-27:12:48
BUL-SC19	18:08:02.40	-27:12:45
BUL-SC20	17:59:16.00	-28:52:10
BUL-SC21	18:00:22.30	-28:51:45
BUL-SC22	17:56:47.60	-30:47:46
BUL-SC23	17:57:54.50	-31:12:36
BUL-SC24	17:53:17.90	-32:52:45
BUL-SC25	17:54:21.00	-32:52:10
BUL-SC26	17:47:15.50	-34:59:31
BUL-SC27	17:48:23.60	-35:09:32
BUL-SC28	17:47:00.00	-37:07:10
BUL-SC29	17:48:10.80	-37:07:21
BUL-SC30	18:01:25.00	-28:49:55
BUL-SC31	18:02:22.60	-28:37:21
BUL-SC32	18:03:24.00	-28:37:10
BUL-SC33	18:05:30.90	-28:52:50
BUL-SC34	17:58:18.50	-29:07:50
BUL-SC35	18:04:28.60	-27:56:56
BUL-SC36	18:05:31.20	-27:56:44
BUL-SC37	17:52:32.20	-29:57:44
BUL-SC38	18:01:28.00	-29:57:01
BUL-SC39	17:55:39.10	-29:44:52
BUL-SC40	17:51:06.10	-33:15:11
BUL-SC41	17:52:07.20	-33:07:41
BUL-SC42	18:09:05.00	-26:51:53
BUL-SC43	17:35:10.00	-27:10:10
BUL-SC44	17:49:22.40	-30:02:45
BUL-SC45	18:03:33.00	-30:05:00

Field	A.R. (h m s)	Dec. (° ' ")
BUL-SC46	18:04:36.00	-30:05:00
BUL-SC47	17:27:00.00	-39:46:00
BUL-SC48	17:28:10.00	-39:46:00
BUL-SC49	17:29:20.00	-40:16:00

Cuadro 6.2: Coordenadas de los centros de los 94 campos del catálogo MACHO [33].

Field	R.A. (h m s)	Dec. (° ' ")
101	18:05:57.73	-27:14:14.40
102	18:10:20.70	-27:43:36.20
103	18:13:31.48	-27:29:57.20
104	18:04:32.97	-27:46:13.00
105	18:07:11.63	-27:57:38.80
106	18:12:37.22	-28:12:10.80
107	18:15:38.66	-28:05:36.80
108	18:01:20.72	-28:17:38.80
109	18:03:50.89	-28:26:22.30
110	18:09:44.47	-28:44:41.60
111	18:12:46.64	-28:54:02.40
112	18:15:14.46	-28:43:42.50
113	18:00:20.94	-28:56:45.10
114	18:03:36.77	-29:08:38.50
115	18:09:34.10	-29:35:30.40
116	18:12:40.80	-29:34:40.50
117	18:15:54.87	-29:26:30.30
118	17:59:42.69	-29:46:55.90

Field	R.A. (h m s)	Dec. (° ' ")
119	18:03:16.75	-29:57:09.60
120	18:06:56.29	-29:44:05.10
121	18:08:03.35	-30:22:23.90
122	18:10:57.57	-30:17:46.30
123	18:14:13.30	-30:14:40.60
124	18:08:03.29	-31:05:16.60
125	18:11:55.14	-30:55:23.60
126	18:14:21.65	-30:55:51.40
127	18:10:00.23	-31:38:40.40
128	18:07:07.05	-28:51:22.60
129	18:19:18.93	-27:52:11.60
130	18:22:39.51	-27:39:43.10
131	18:25:48.36	-28:09:39.40
132	18:29:03.94	-28:00:42.00
133	18:32:15.08	-27:41:35.50
134	18:35:32.92	-27:43:41.00
135	18:19:11.94	-28:37:43.40
136	18:22:34.51	-28:25:15.90
137	18:25:30.59	-28:52:28.40
138	18:28:44.75	-28:48:14.30
139	18:31:53.91	-28:25:00.60
140	18:34:52.17	-28:20:59.30
141	18:19:12.93	-29:20:23.70
142	18:22:23.94	-29:04:44.20
143	18:26:07.08	-29:30:13.40
144	18:32:03.72	-29:10:54.80
145	18:35:06.76	-28:55:40.60
146	18:23:06.63	-29:46:36.30
147	18:29:46.36	-29:43:39.80

Field	R.A. (h m s)	Dec. (° ' ")
148	18:17:44.20	-30:13:04.60
149	18:20:56.35	-30:27:20.30
150	18:24:26.02	-30:15:04.20
151	18:28:32.28	-30:27:30.80
152	18:18:00.60	-30:52:50.40
153	18:22:04.06	-30:56:36.40
154	18:24:50.43	-31:11:15.90
155	18:17:56.58	-31:42:38.80
156	18:21:29.27	-31:43:53.70
157	18:17:17.44	-32:40:42.40
158	18:18:38.95	-24:58:28.40
159	18:16:58.38	-25:35:49.60
160	18:20:28.25	-25:27:51.70
161	18:13:47.68	-26:06:28.90
162	18:16:19.52	-26:19:34.00
163	18:19:25.40	-26:18:11.70
164	18:23:11.82	-26:09:39.20
165	18:26:04.83	-25:56:04.10
166	18:29:00.09	-26:09:53.40
167	18:13:06.36	-26:47:55.00
168	18:16:12.61	-27:01:20.00
169	18:19:49.68	-27:00:17.60
170	18:22:57.05	-26:54:24.10
171	18:25:57.69	-26:34:42.80
172	18:30:37.50	-26:39:18.90
173	18:34:02.92	-26:55:16.70
174	18:25:37.38	-27:19:40.40
175	18:28:55.87	-27:16:02.40
176	18:01:20.72	-27:34:39.00

Field	R.A. (h m s)	Dec. (° ' ")
177	18:15:33.00	-24:58:28.00
178	18:10:47.70	-26:06:29.00
179	18:07:47.70	-26:06:29.00
180	18:09:25.09	-25:09:25.60
301	18:32:37.68	-13:31:43.90
302	18:32:02.52	-14:12:46.50
303	18:30:51.46	-14:57:51.70
304	18:16:01.22	-22:23:56.60
305	18:16:00.27	-21:41:56.60
306	18:16:02.18	-23:05:56.60
307	18:16:03.15	-23:47:56.50
308	18:19:00.25	-21:41:43.50
309	18:19:01.19	-22:23:43.50
310	18:19:02.15	-23:05:43.50
311	18:19:03.12	-23:47:43.40
401	17:57:52.20	-28:10:45.00
402	17:56:49.00	-28:54:45.00
403	17:56:03.00	-29:39:00.00

# Apéndice B

Cuadro 6.3: Centros de los campos comunes del catálogo OGLE II y MACHO.

OGLE II			MACHO		
Field	A.R. (h m s)	Dec. (° ' ")	Field	A.R. (h m s)	Dec. (° ' ")
BUL-SC1	18:02:32.50	-29:57:41	119	18:03:16.75	-29:57:09.60
BUL-SC2	18:04:28.60	-28:52:35	109	18:03:50.89	-28:26:22.30
BUL-SC2	18:04:28.60	-28:52:35	114	18:03:36.77	-29:08:38.50
BUL-SC4	17:54:35.70	-29:43:41	403	17:56:03.00	-29:39:00.00
BUL-SC10	18:20:06.60	-22:23:03	309	18:19:01.19	-22:23:43.50
BUL-SC12	18:16:06.30	-23:57:54	307	18:16:03.15	-23:47:56.50
BUL-SC13	18:17:02.60	-23:57:44	307	18:16:03.15	-23:47:56.50
BUL-SC16	18:10:06.70	-26:18:05	178	18:10:47.70	-26:06:29.00
BUL-SC17	18:11:03.60	-26:12:35	178	18:10:47.70	-26:06:29.00
BUL-SC18	18:07:03.50	-27:12:48	101	18:05:57.73	-27:14:14.40
BUL-SC20	17:59:16.00	-28:52:10	113	18:00:20.94	-28:56:45.10
BUL-SC21	18:00:22.30	-28:51:45	113	18:00:20.94	-28:56:45.10
BUL-SC30	18:01:25.00	-28:49:55	113	18:00:20.94	-28:56:45.10
BUL-SC31	18:02:22.60	-28:37:21	108	18:01:20.72	-28:17:38.80
BUL-SC31	18:02:22.60	-28:37:21	109	18:03:50.89	-28:26:22.30
BUL-SC32	18:03:24.00	-28:37:10	109	18:03:50.89	-28:26:22.30
BUL-SC33	18:05:30.90	-28:52:50	128	18:07:07.05	-28:51:22.60
BUL-SC34	17:58:18.50	-29:07:50	402	17:56:49.00	-28:54:45.00



OGLE II			MACHO		
Field	A.R. (h m s)	Dec. (° ' ")	Field	A.R. (h m s)	Dec. (° ' ")
BUL-SC35	18:04:28.60	-27:56:56	104	18:04:32.97	-27:46:13.00
BUL-SC36	18:05:31.20	-27:56:44	104	18:04:32.97	-27:46:13.00
BUL-SC36	18:05:31.20	-27:56:44	105	18:07:11.63	-27:57:38.80
BUL-SC38	18:01:28.00	-29:57:01	118	17:59:42.69	-29:46:55.90
BUL-SC38	18:01:28.00	-29:57:01	119	18:03:16.75	-29:57:09.60
BUL-SC39	17:55:39.10	-29:44:52	403	17:56:03.00	-29:39:00.00
BUL-SC45	18:03:33.00	-30:05:00	119	18:03:16.75	-29:57:09.60
BUL-SC46	18:04:36.00	-30:05:00	119	18:03:16.75	-29:57:09.60

# Apéndice C

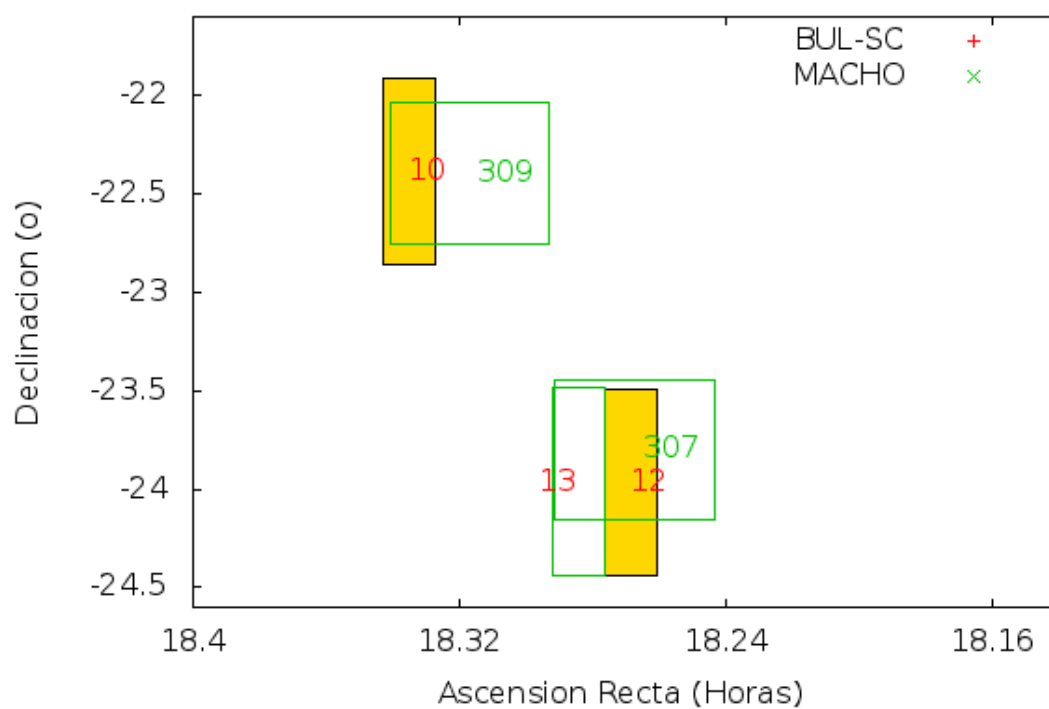


Figura 6.1: Intersección de los campos 10,12 y 13 del catálogo OGLE II con los campos 307 y 309 de MACHO.

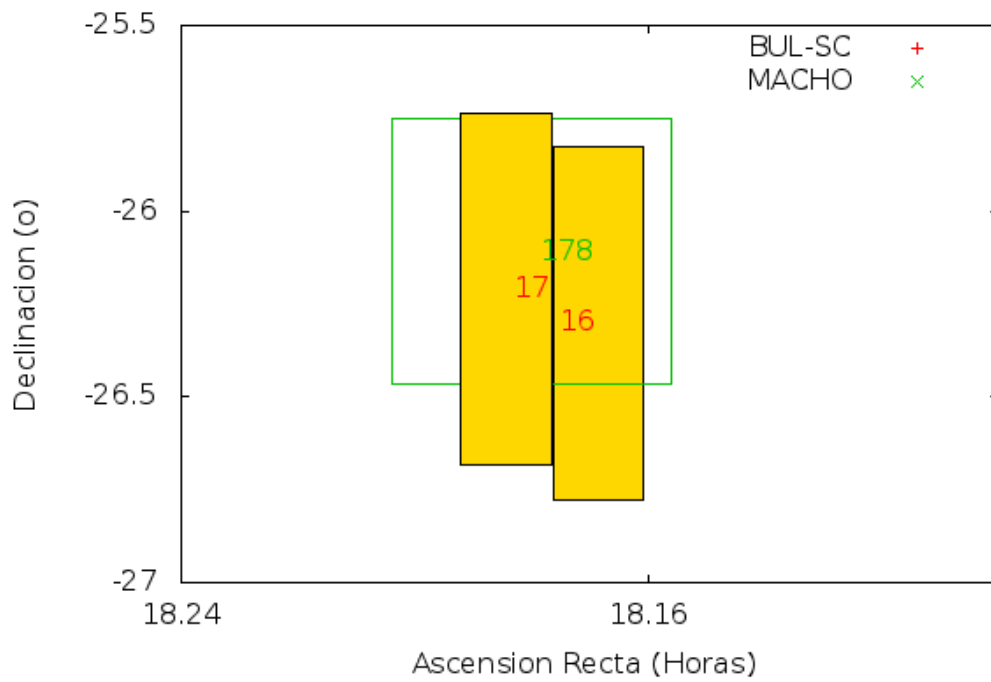


Figura 6.2: Intersección de los campos 16 y 17 del catálogo OGLE II con el campo 178 de MACHO.

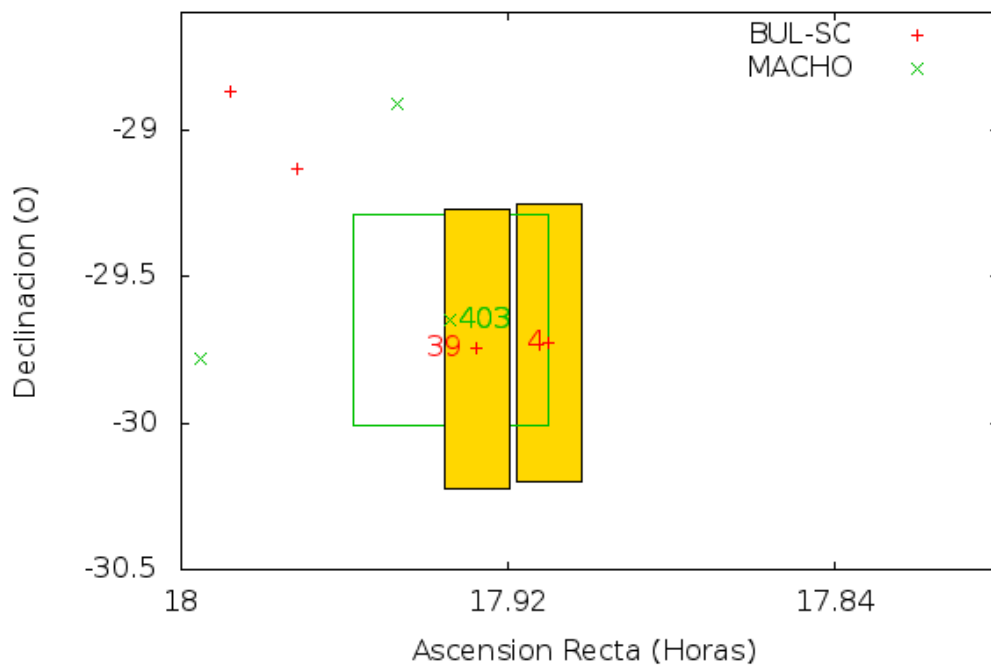


Figura 6.3: Intersección de los campos 4 y 39 del catálogo OGLE II con el campo 403 de MACHO.

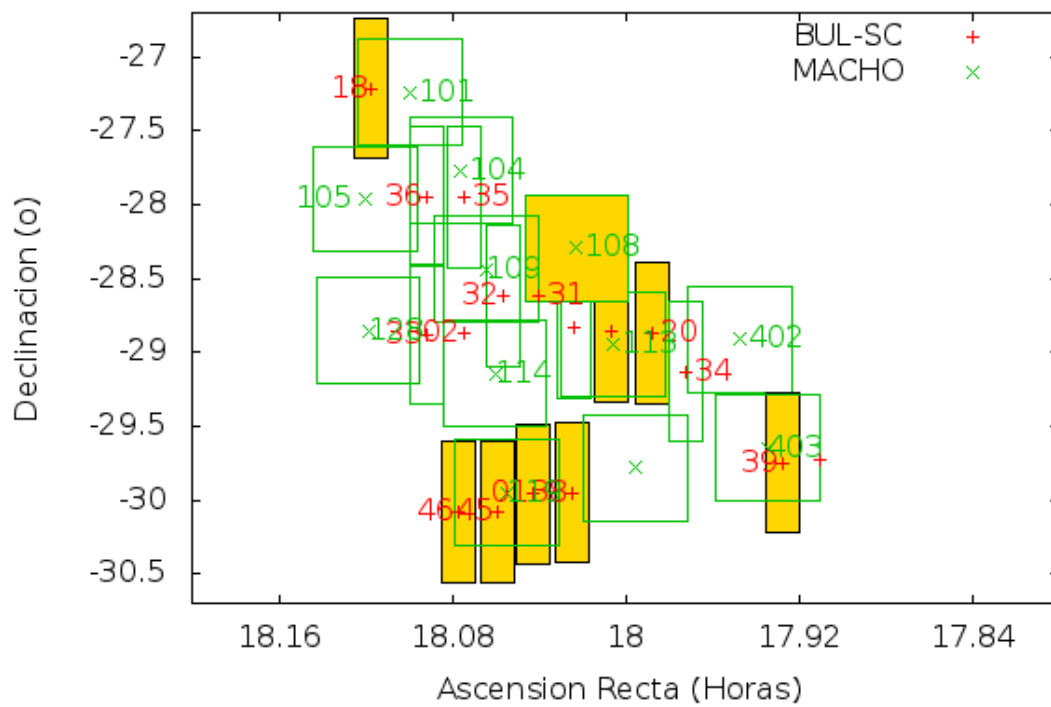


Figura 6.4: Intersección de los campos 18, 35, 36, 32, 31, 33, 02, 20, 34, 46, 45, 01, 38 y 39 del catálogo OGLE II con los campos 101, 105, 104, 108, 109, 114, 113, 119, 128, 402 y 403 de MACHO.

# Apéndice D

Cuadro 6.4: Información de las binarias eclipsantes del campo 45 de OGLE II y su contrapartida MACHO 119.

OGLE	MACHO	ÉPOCA		PERIODO (d)	FILTRO		
		OGLE (DJHM)	MACHO (DJM)		I	R	V
bul-sc45-501	119-20087-3373	1692.86099	51415.0283	1.06022	✓	✓	✓
bul-sc45-516	119-20347-48	1804.63441	51340.9941	1.0832	✓	✓	✓
bul-sc45-520	119-20347-687	1230.87836	51345.2426	0.50386	✓	✓	✓
bul-sc45-532	119-20087-3355	685.60857	49625.9718	70.94137	✓	✓	✓
bul-sc45-534	119-20087-3296	1786.58758	51243.2425	45.46575	✓	✓	✓
bul-sc45-539	119-20217-793	1695.76018	49571.8983	1.58029	✓	✓	✓
bul-sc45-575	119-20347-154	887.86289	51236.2195	0.30719	✓	✓	✓
bul-sc45-624	119-20218-179	1320.74818	49143.1646	0.69838	✓	✓	✓
bul-sc45-627	119-20218-30	1752.75556	51280.3161	13.8958	✓	✓	✓
bul-sc45-630	119-20218-837	1751.6227	49111.1553	1.54686	✓	✓	✓
bul-sc45-640	119-20478-43	1340.78057	51253.239	7.00091	✓	✓	✓
bul-sc45-666	119-20348-472	1652.88611	49580.0827	0.31114	✓	✓	✓
bul-sc45-673	119-20088-3317	1340.78072	49599.9063	93.99715	✓	✓	✓
bul-sc45-675	119-20088-3874	1289.76466	51035.901	0.39236	✓	✓	X
bul-sc45-679	119-20218-105	1815.50614	51242.2672	71.6879	✓	✓	✓
bul-sc45-701	119-20088-3318	911.91807	51410.0749	166.27872	✓	✓	✓
bul-sc45-718	119-20348-1027	1398.68433	49143.1646	0.36083	✓	✓	✓
bul-sc45-753	119-20349-52	1256.90238	49603.9597	6.45695	✓	✓	✓

OGLE	MACHO	ÉPOCA		PERIODO (d)	FILTRO		
		OGLE (DJHM)	MACHO (DJM)		I	R	V
bul-sc45-776	119-20219-702	1804.63505	49991.9074	0.28691	✓	✓	✓
bul-sc45-779	119-20219-1116	1763.62556	51420.0224	2.66399	✓	✓	✓
bul-sc45-790	119-20349-1342	1342.76705	50985.9959	2.02695	✓	✓	✓
bul-sc45-803	119-20089-3962	1087.6245	51397.0108	1.23765	✓	✓	✓
bul-sc45-875	119-20219-1481	707.58362	51351.1582	0.86156	✓	✓	✓
bul-sc45-931	119-20220-34	1818.59417	51419.9688	0.48612	✓	✓	✓
bul-sc45-934	119-20090-3977	1764.66084	51396.9504	0.41455	✓	✓	✓
bul-sc45-989	119-20350-1486	1786.58861	50978.9909	0.74913	✓	✓	✓
bul-sc45-1041	119-20091-4263	1773.65619	49944.935	0.79233	✓	✓	✓
bul-sc45-1051	119-20351-54	733.50994	49809.281	3.77242	✓	✓	✓
bul-sc45-1052	119-20351-1362	1365.58422	49800.2123	0.41648	✓	✓	✓
bul-sc45-1064	119-20480-193	1749.56655	51433.9188	78.797149	✓	✓	✓
bul-sc45-1111	119-20091-4191	1317.92508	51243.2425	1.52484	✓	✓	✓
bul-sc45-1153	119-20221-812	1751.6238	49642.9229	1.70332	✓	✓	✓
bul-sc45-1155	119-20351-1214	1087.62514	49143.1646	5.4016	✓	✓	✓
bul-sc45-1209	119-20351-646	898.85484	50644.9994	0.47496	✓	✓	✓
bul-sc45-1218	119-20091-4165	1669.80474	51411.9737	1.06538	✓	✓	✓
bul-sc45-1241	119-20481-690	1297.78907	50953.1412	0.38464	✓	✓	✓
bul-sc45-1253	119-20092-2651	1335.7943	51406.0207	0.66899	✓	✓	✓
bul-sc45-1265	119-20092-4158	1730.86723	50231.0761	0.94804	✓	✓	✓
bul-sc45-1270	119-20222-2866	714.49219	49640.9273	1.23968	✓	✓	✓
bul-sc45-1303	119-20352-2332	1072.62696	51048.8986	1.18573	✓	✓	✓
bul-sc45-1304	119-20352-2718	1687.76196	49798.2365	1.24395	✓	✓	✓
bul-sc45-1309	119-20352-3100	1332.74784	51440.0082	0.5337	✓	✓	✓
bul-sc45-1315	119-20092-999	1788.62602	51409.0022	0.63909	✓	✓	✓
bul-sc45-1358	119-20092-897	1776.68833	51284.2826	0.77176	✓	✓	✓
bul-sc45-1376	119-20352-310	1459.56209	50669.8841	0.27835	✓	✓	✓
bul-sc45-1406	119-20223-6866	1652.88764	51443.99	1.33059	✓	X	✓

OGLE	MACHO	ÉPOCA		PERIODO (d)	FILTRO		
		OGLE (DJHM)	MACHO (DJM)		I	R	V
bul-sc45-1450	119-20223-1396	1660.90928	51288.1358	1.8456	✓	✓	✓
bul-sc45-1451	119-20223-1329	1687.76229	51301.2558	0.6496	✓	✓	✓
bul-sc45-1464	119-20483-483	1288.90944	50172.3096	0.989	✓	✓	✓
bul-sc45-1474	119-20093-2405	1652.88772	49561.9342	3.39439	✓	✓	✓
bul-sc45-1505	119-20093-3190	1089.60814	51358.1223	0.34184	✓	✓	✓
bul-sc45-1506	119-20093-2539	1299.71113	51276.248	1.56408	✓	✓	✓
bul-sc45-1522	119-20353-1964	1266.77821	51288.1358	2.42428	✓	✓	✓
bul-sc45-1591	119-20483-447	1092.55061	49501.094	1.21668	✓	✓	✓
bul-sc45-1597	119-20094-49	1459.56255	51416.0425	29.13239	✓	✓	✓
bul-sc45-1598	119-20224-1270	936.71523	51405.0433	0.6122	✓	✓	✓
bul-sc45-1678	119-20094-2461	1089.60835	50197.1263	2.72092	✓	✓	✓
bul-sc45-1681	119-20094-287	1307.92796	51350.9079	0.24702	✓	✓	✓
bul-sc45-1682	119-20094-179	1448.5005	51350.9391	0.44348	✓	✓	✓
bul-sc45-1689	119-20224-374	1332.74847	51289.2288	93.6869	✓	✓	✓
bul-sc45-1697	119-20224-415	1256.90407	51316.1349	13.03261	✓	✓	✓
bul-sc45-1753	119-20354-45	1365.58535	51413.8642	1.27066	✓	✓	✓
bul-sc45-1759	119-20094-2104	1261.86296	50911.1689	0.43701	✓	✓	✓
bul-sc45-1814	119-20224-748	1730.86819	49640.9273	1.75775	✓	✓	✓
bul-sc45-1820	119-20355-744	685.61068	51305.2696	0.22774	✓	✓	✓
bul-sc45-1830	119-20484-308	1731.77575	51299.0539	0.71878	✓	✓	✓
bul-sc45-1843	119-20225-180	1289.7668	51317.1365	27.33793	✓	✓	✓
bul-sc45-1847	119-20225-625	1394.72242	51280.2279	0.36003	✓	✓	✓
bul-sc45-1896	119-20225-1894	1729.85927	51314.1618	3.32538	✓	✓	✓
bul-sc45-1899	119-20355-1029	1089.60874	49569.8781	3.99927	✓	✓	✓
bul-sc45-1925	119-20355-583	1731.77602	50301.9198	0.25826	✓	✓	✓
bul-sc45-1927	119-20485-331	1448.50092	49571.8983	0.88768	✓	✓	✓
bul-sc45-1933	119-20485-299	1297.7903	51420.0224	0.46654	✓	✓	✓
bul-sc45-1943	119-20095-3974	1072.62812	49884.1398	4.01517	✓	✓	✓

OGLE	MACHO	ÉPOCA		PERIODO (d)	FILTRO		
		OGLE (DJHM)	MACHO (DJM)		I	R	V
bul-sc45-1944	119-20095-476	1261.86329	51405.0909	0.45539	✓	✓	X
bul-sc45-1970	119-20355-6233	1695.76291	49954.8946	0.25697	✓	X	✓
bul-sc45-2057	119-20356-1368	1619.87815	49599.9063	0.33322	✓	✓	✓
bul-sc45-2085	119-20226-333	1041.57125	51321.2523	10.75676	✓	✓	✓
bul-sc45-2086	119-20226-667	1401.69247	49489.2576	1.33231	✓	✓	✓
bul-sc45-2092	119-20226-1288	1328.62896	51305.2335	0.27357	✓	✓	✓
bul-sc45-2094	119-20356-1701	1748.67623	50197.1263	0.5351	✓	✓	✓
bul-sc45-2099	119-20096-1563	1317.69686	50910.1482	0.34862	✓	✓	✓
bul-sc45-2159	119-20356-120	1462.55331	51278.1974	187.02841	✓	✓	✓
bul-sc45-2161	119-20357-10	1773.65813	51280.1265	1.24954	✓	✓	✓
bul-sc45-2170	119-20357-617	1786.59071	50189.1619	23.68345	✓	✓	✓
bul-sc45-2177	119-20097-1578	1769.63832	51351.929	0.84729	✓	✓	✓
bul-sc45-2193	119-20357-35	1772.65026	51352.902	5.6721	✓	✓	✓
bul-sc45-2230	119-20227-122	858.88121	51331.0132	84.9912	✓	✓	✓
bul-sc45-2262	119-20357-778	1731.77662	49233.8846	0.49434	✓	✓	✓



# Apéndice E

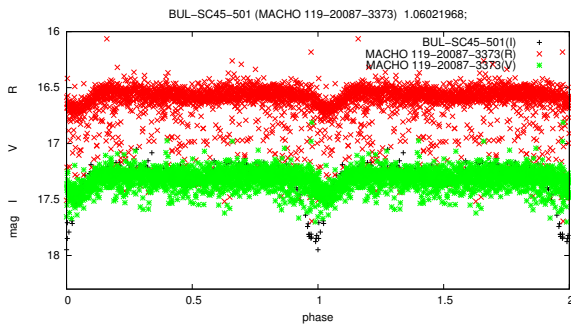


Figura 6.5: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-501 y su contrapartida MACHO 119-20087-3373.

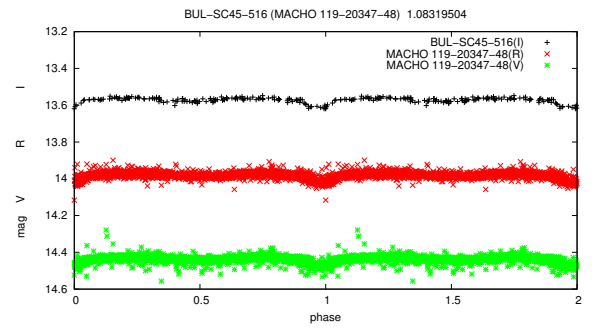


Figura 6.6: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-516 y su contrapartida MACHO 119-20347-48.

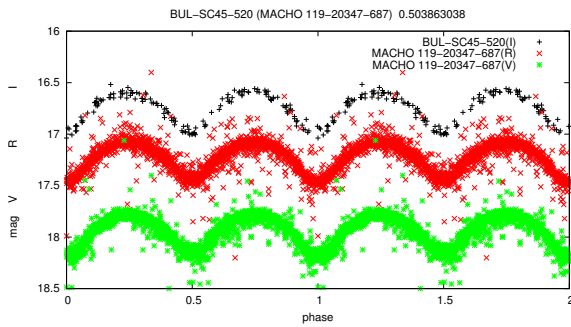


Figura 6.7: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-520 y su contrapartida MACHO 119-20347-687.

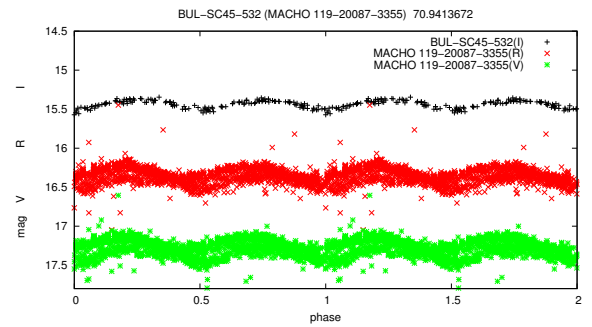


Figura 6.8: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-532 y su contrapartida MACHO 119-20087-3355.

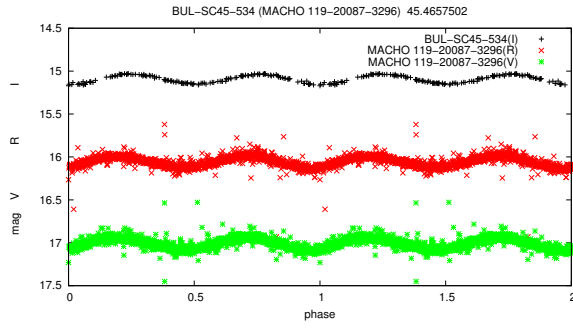


Figura 6.9: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-534 y su contrapartida MACHO 119-20087-3296.

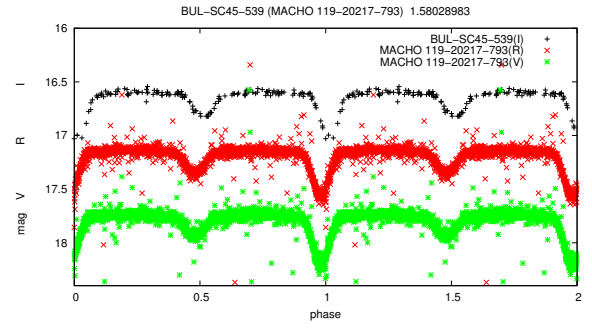


Figura 6.10: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-539 y su contrapartida MACHO 119-20217-793.

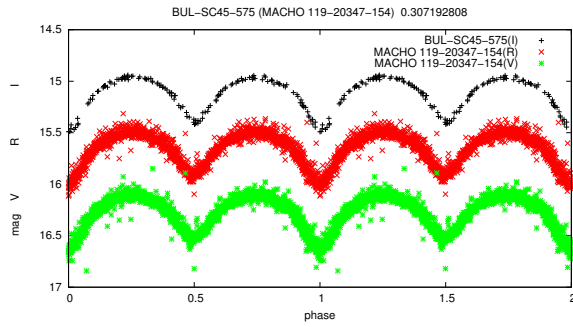


Figura 6.11: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-575 y su contrapartida MACHO 119-20347-154.

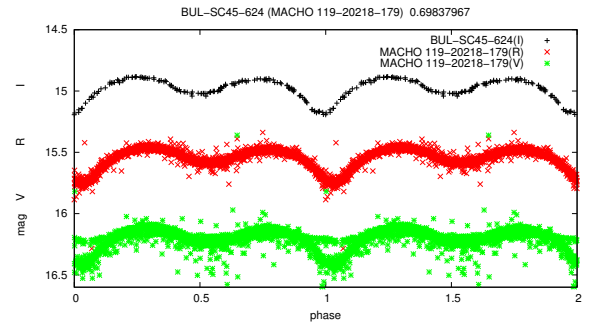


Figura 6.12: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-624 y su contrapartida MACHO 119-20218-179.

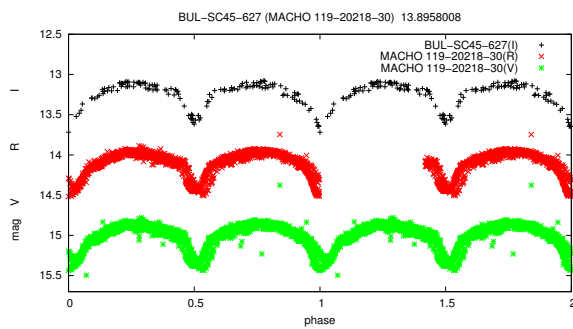


Figura 6.13: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-627 y su contrapartida MACHO 119-20218-30.

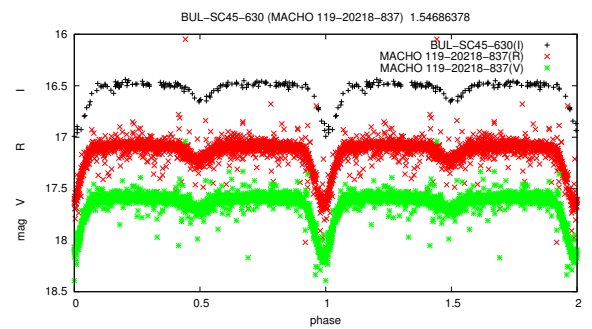


Figura 6.14: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-630 y su contrapartida MACHO 119-20218-837.

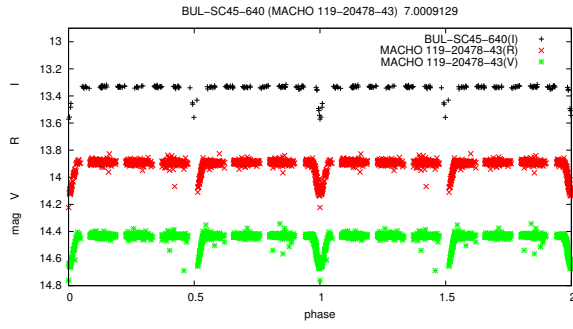


Figura 6.15: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-640 y su contrapartida MACHO 119-20478-43.

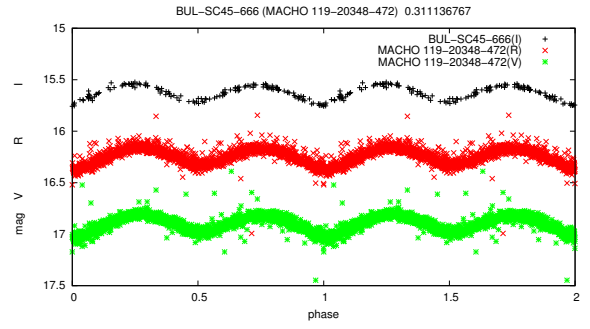


Figura 6.16: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-666 y su contrapartida MACHO 119-20348-472.

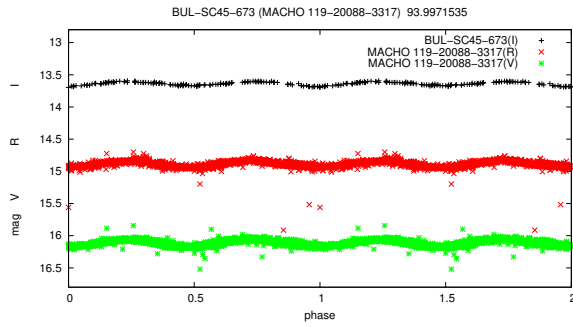


Figura 6.17: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-673 y su contrapartida MACHO 119-20088-3317.

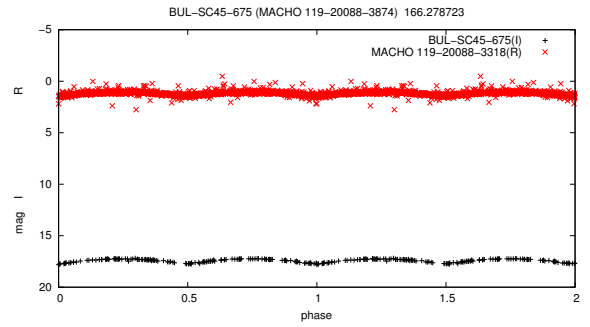


Figura 6.18: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-675 y su contrapartida MACHO 119-20088-3874.

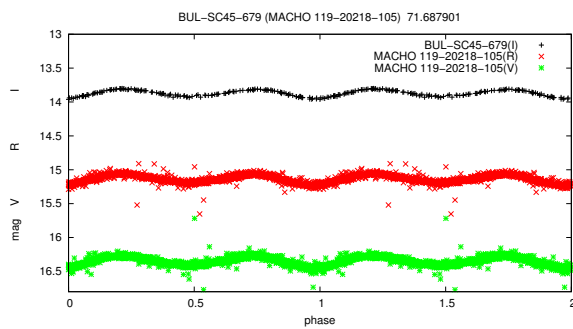


Figura 6.19: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-679 y su contrapartida MACHO 119-20218-105.

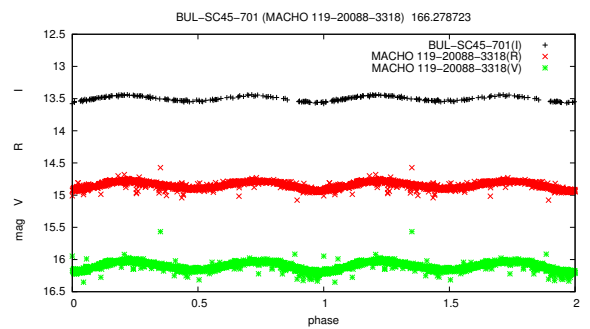


Figura 6.20: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-701 y su contrapartida MACHO 119-20088-3318.

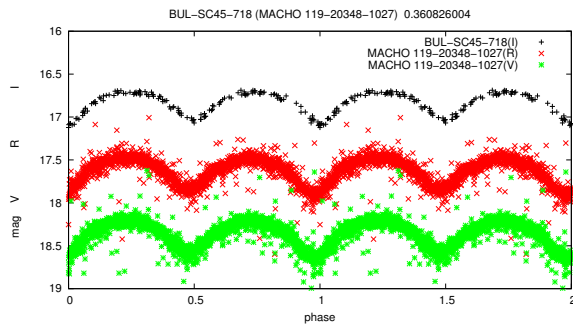


Figura 6.21: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-718 y su contrapartida MACHO 119-20348-1027.

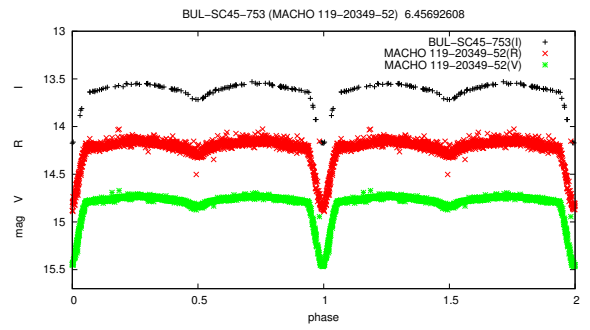


Figura 6.22: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-753 y su contrapartida MACHO 119-20349-52.

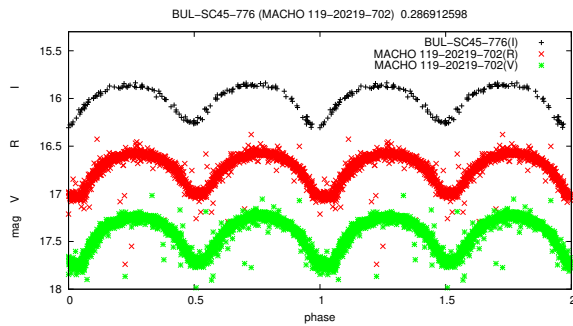


Figura 6.23: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-776 y su contrapartida MACHO 119-20219-702.

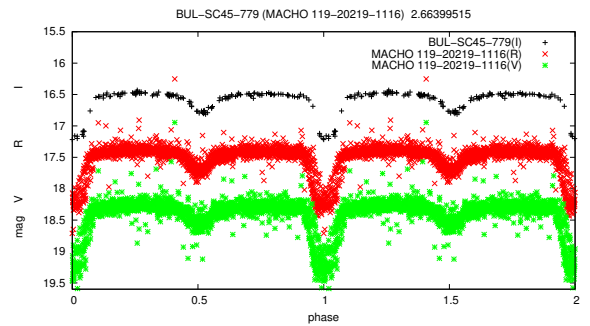


Figura 6.24: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-779 y su contrapartida MACHO 119-20219-1116.

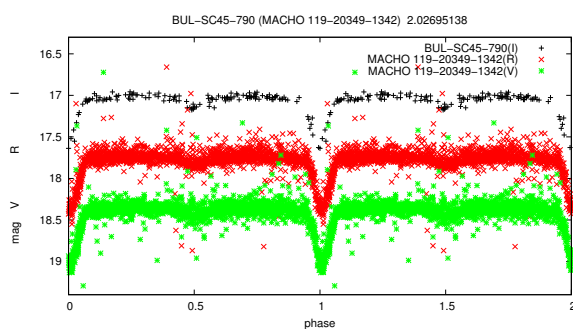


Figura 6.25: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-790 y su contrapartida MACHO 119-20349-1342.

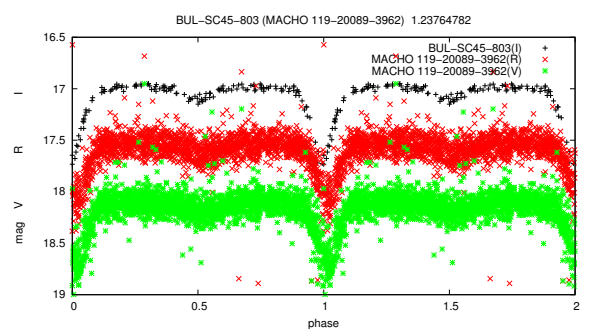


Figura 6.26: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-803 y su contrapartida MACHO 119-20089-3962.

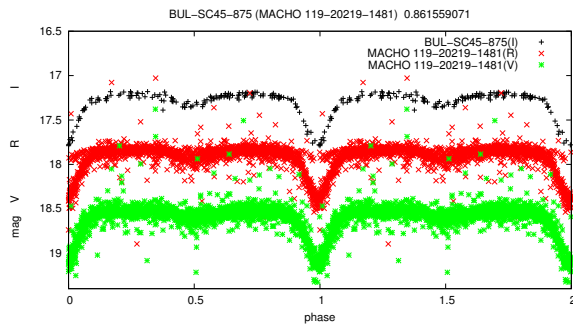


Figura 6.27: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-875 y su contrapartida MACHO 119-20219-1481.

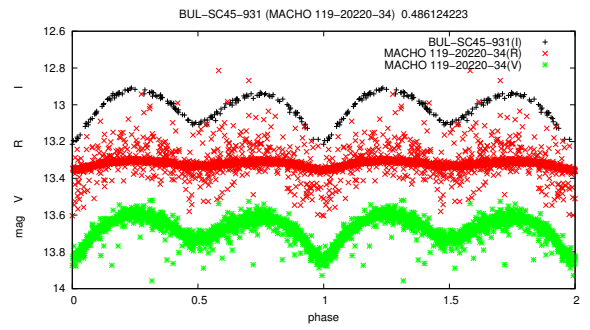


Figura 6.28: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-931 y su contrapartida MACHO 119-20220-34.

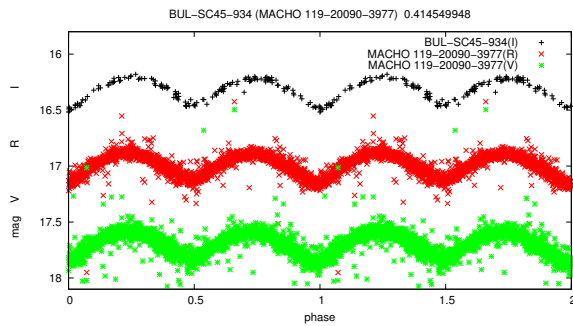


Figura 6.29: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-934 y su contrapartida MACHO 119-20090-3977.

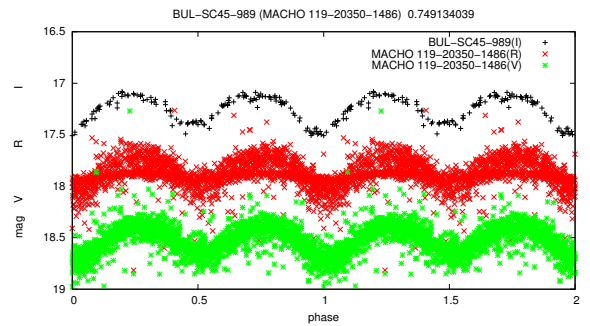


Figura 6.30: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-989 y su contrapartida MACHO 119-20350-1486.

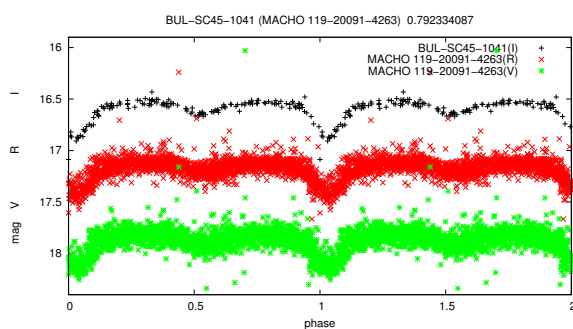


Figura 6.31: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1041 y su contrapartida MACHO 119-20091-4263.

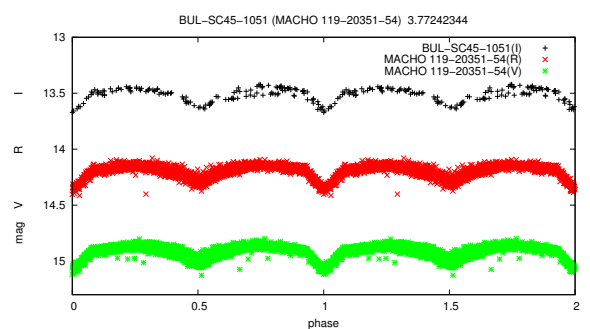


Figura 6.32: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1051 y su contrapartida MACHO 119-20351-54.

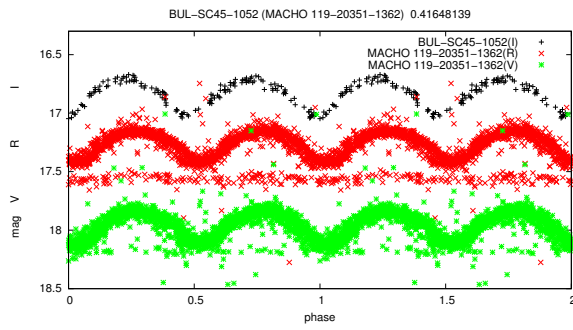


Figura 6.33: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1052 y su contrapartida MACHO 119-20351-1362.

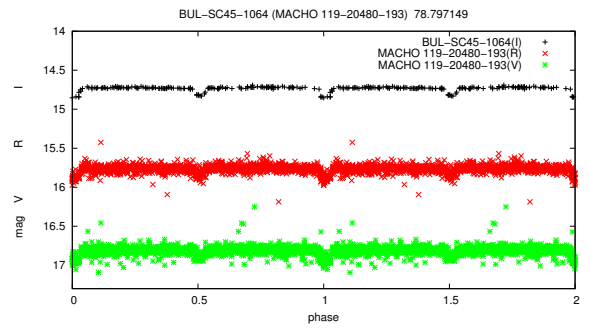


Figura 6.34: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1064 y su contrapartida MACHO 119-20480-193.

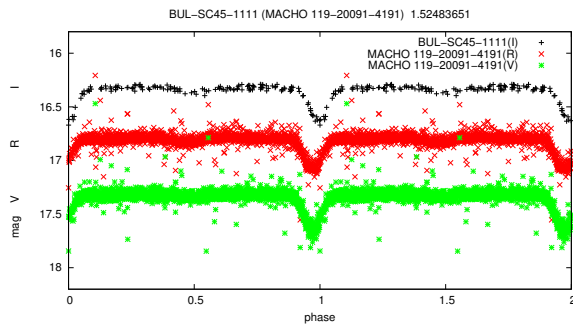


Figura 6.35: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1111 y su contrapartida MACHO 119-20091-4191.

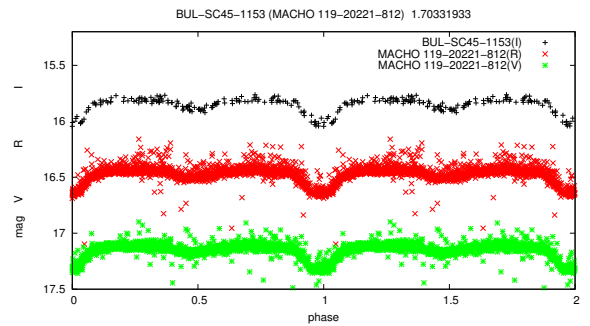


Figura 6.36: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1153 y su contrapartida MACHO 119-20221-812.

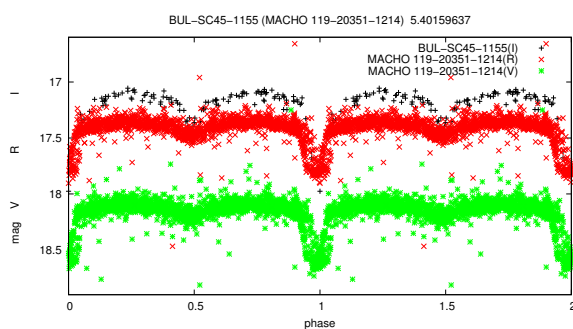


Figura 6.37: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1155 y su contrapartida MACHO 119-20351-1214.

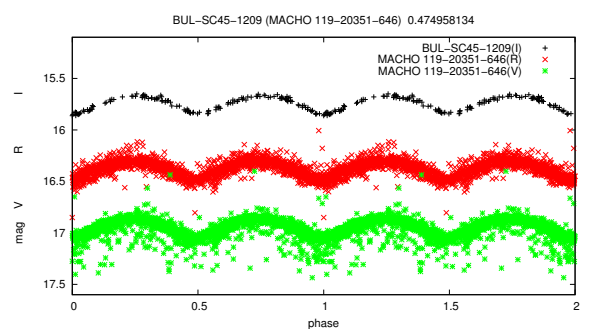


Figura 6.38: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1209 y su contrapartida MACHO 119-20351-646.

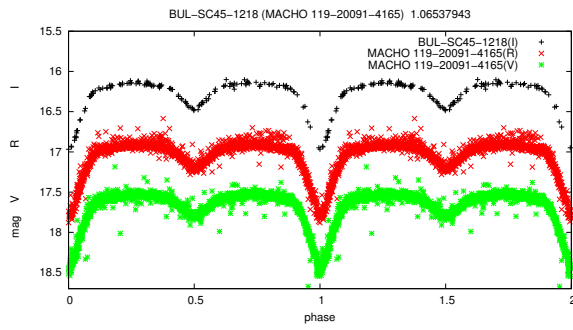


Figura 6.39: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1218 y su contrapartida MACHO 119-20091-4165.

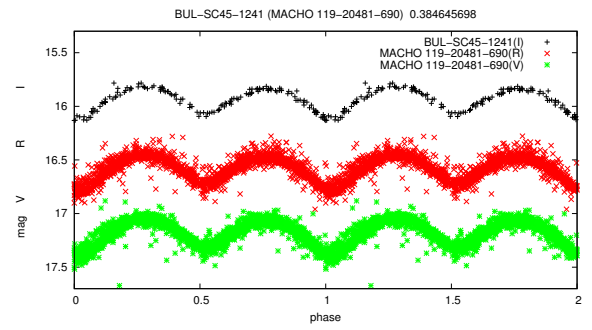


Figura 6.40: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1241 y su contrapartida MACHO 119-20481-690.

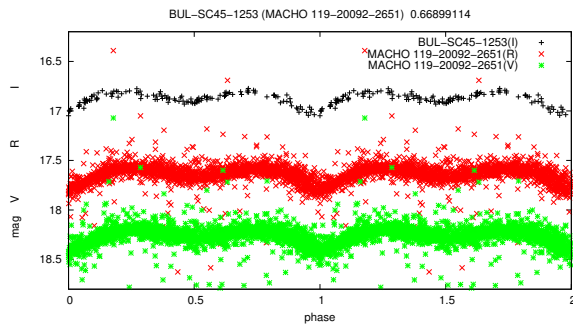


Figura 6.41: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1253 y su contrapartida MACHO 119-20092-2651.

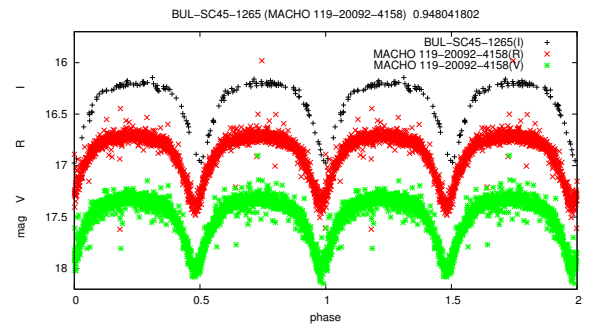


Figura 6.42: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1265 y su contrapartida MACHO 119-20092-4158.

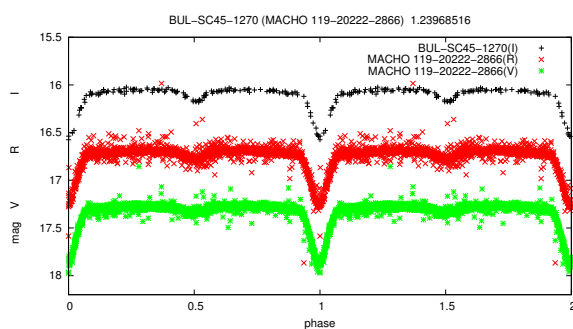


Figura 6.43: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1270 y su contrapartida MACHO 119-20222-2866.

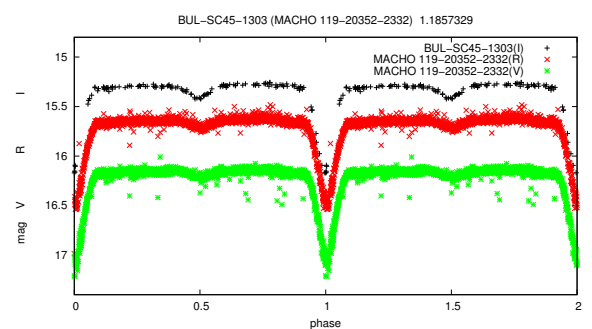


Figura 6.44: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1303 y su contrapartida MACHO 119-20352-2332.

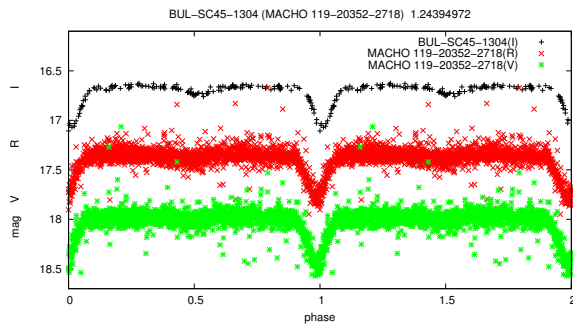


Figura 6.45: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1304 y su contrapartida MACHO 119-20352-2718.

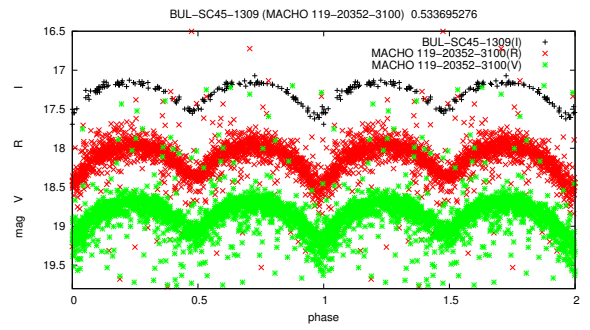


Figura 6.46: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1309 y su contrapartida MACHO 119-20352-3100.

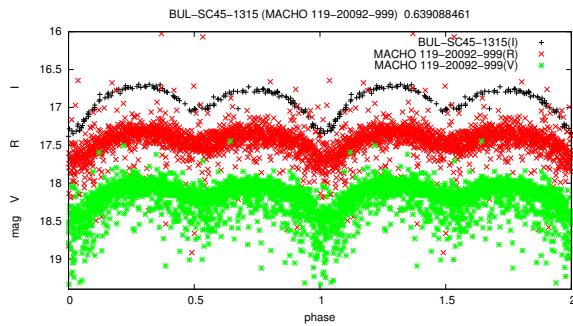


Figura 6.47: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1315 y su contrapartida MACHO 119-20092-999.

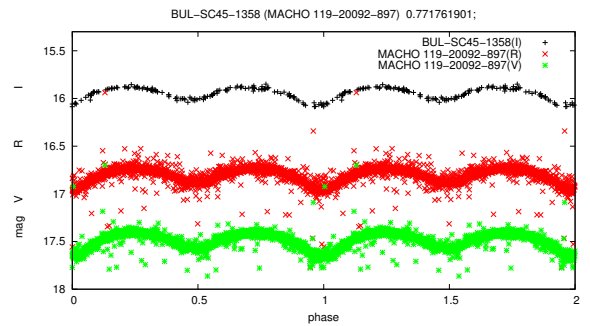


Figura 6.48: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1358 y su contrapartida MACHO 119-20092-897.

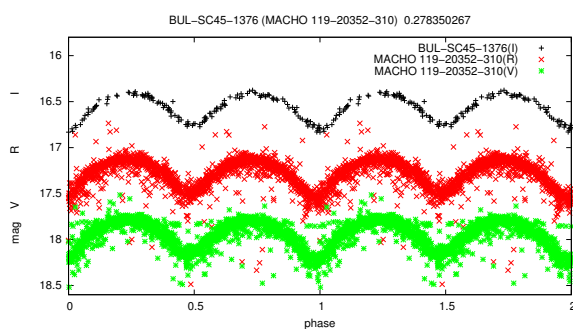


Figura 6.49: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1376 y su contrapartida MACHO 119-20352-310.

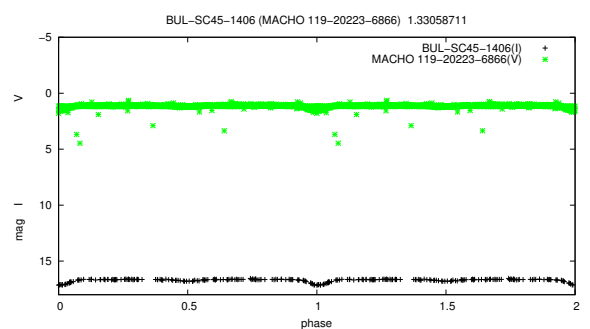


Figura 6.50: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1406 y su contrapartida MACHO 119-20223-6866.



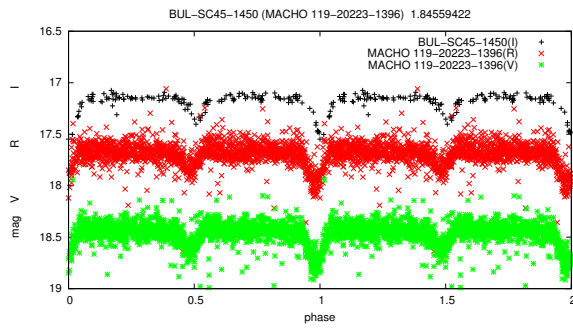


Figura 6.51: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1450 y su contrapartida MACHO 119-20223-1396.

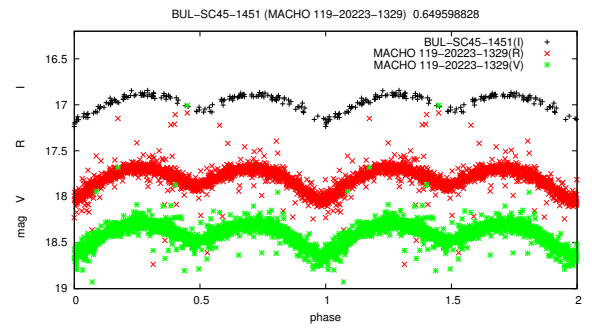


Figura 6.52: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1451 y su contrapartida MACHO 119-20223-1329.

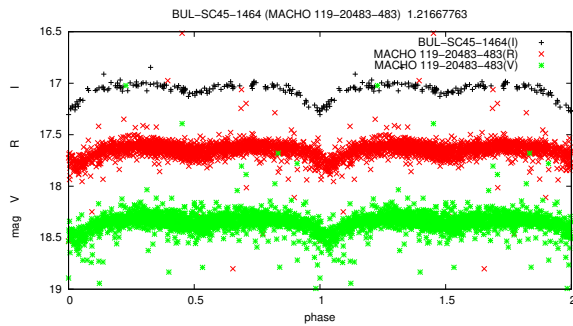


Figura 6.53: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1464 y su contrapartida MACHO 119-20483-483.

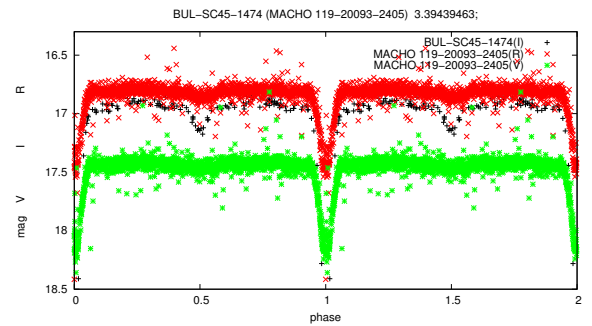


Figura 6.54: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1474 y su contrapartida MACHO 119-20093-2405.

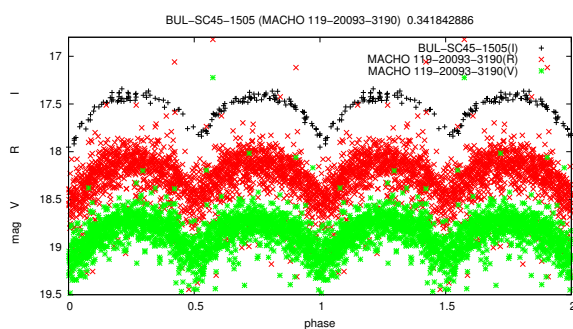


Figura 6.55: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1505 y su contrapartida MACHO 119-20093-3190.

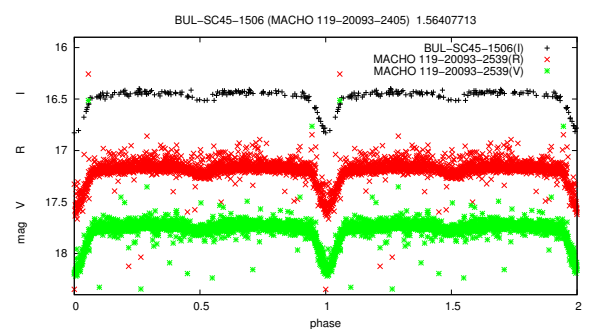


Figura 6.56: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1506 y su contrapartida MACHO 119-20093-2405.

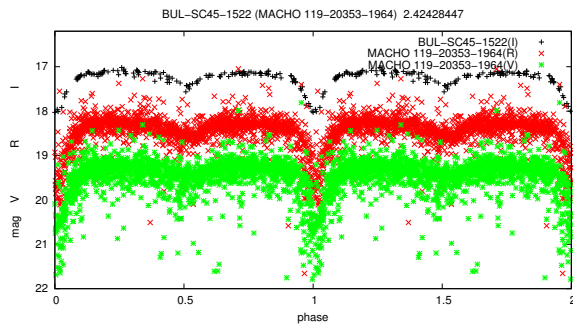


Figura 6.57: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1522 y su contrapartida MACHO 119-20353-1964.

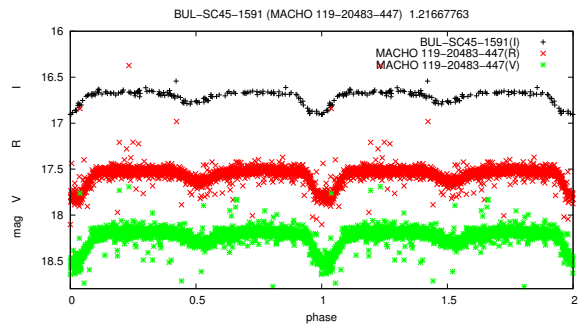


Figura 6.58: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1591 y su contrapartida MACHO 119-20483-447.

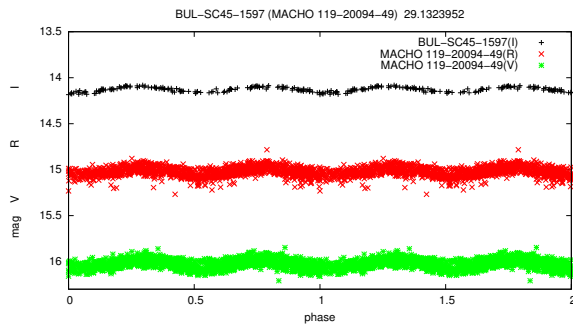


Figura 6.59: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1597 y su contrapartida MACHO 119-20094-49.

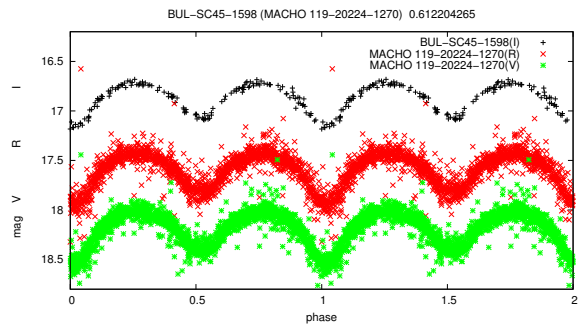


Figura 6.60: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1598 y su contrapartida MACHO 119-20224-1270.

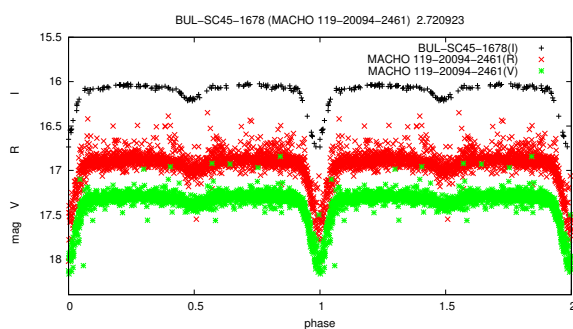


Figura 6.61: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1678 y su contrapartida MACHO 119-20094-2461.

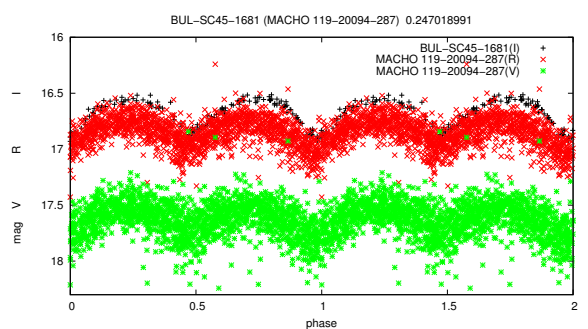


Figura 6.62: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1681 y su contrapartida MACHO 119-20094-287.

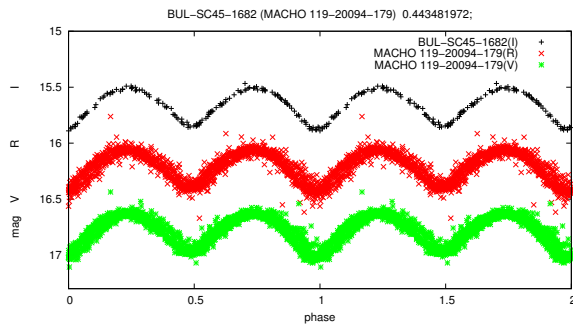


Figura 6.63: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1682 y su contrapartida MACHO 119-20094-179.

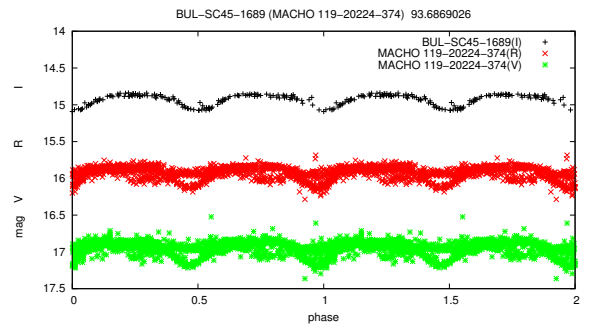


Figura 6.64: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1689 y su contrapartida MACHO 119-20224-374.

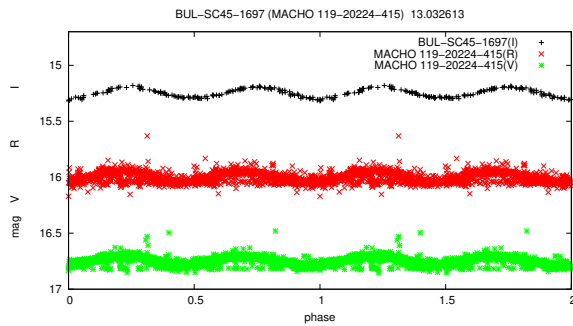


Figura 6.65: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1697 y su contrapartida MACHO 119-20224-415.

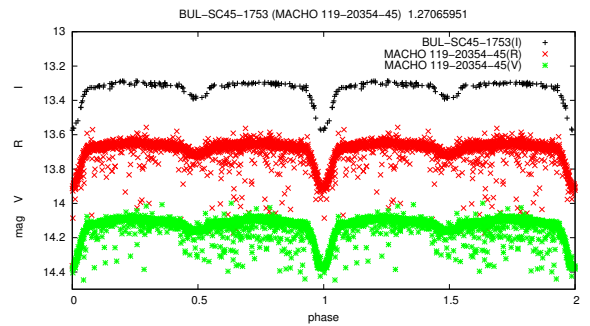


Figura 6.66: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1753 y su contrapartida MACHO 119-20354-45.

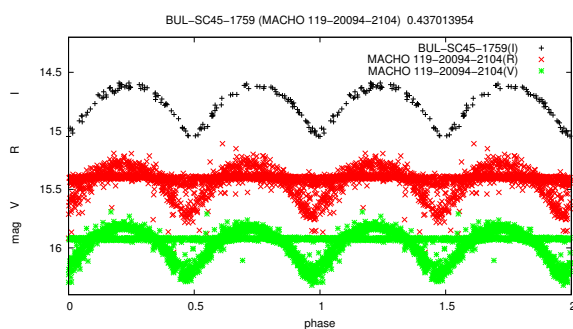


Figura 6.67: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1759 y su contrapartida MACHO 119-20094-2104.

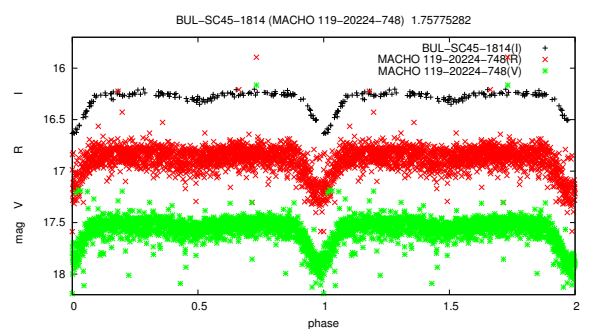


Figura 6.68: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1814 y su contrapartida MACHO 119-20224-748.

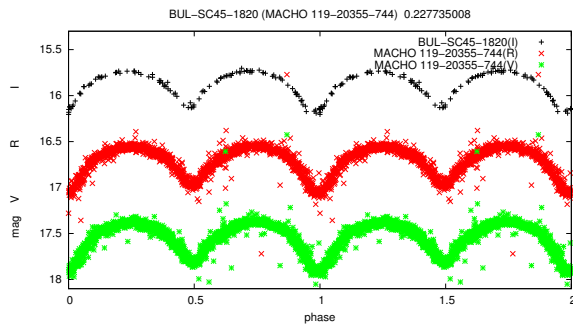


Figura 6.69: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1820 y su contrapartida MACHO 119-20355-744.

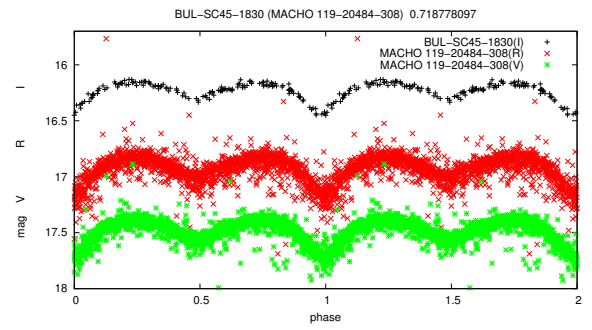


Figura 6.70: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1830 y su contrapartida MACHO 119-20484-308.

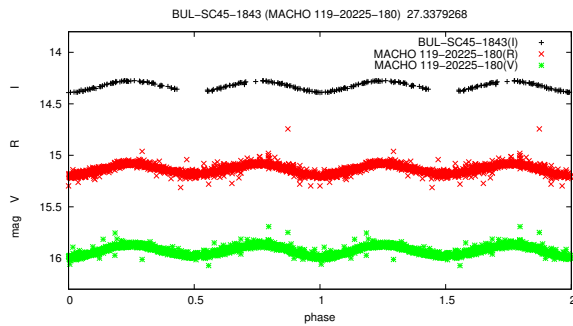


Figura 6.71: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1843 y su contrapartida MACHO 119-20225-180.

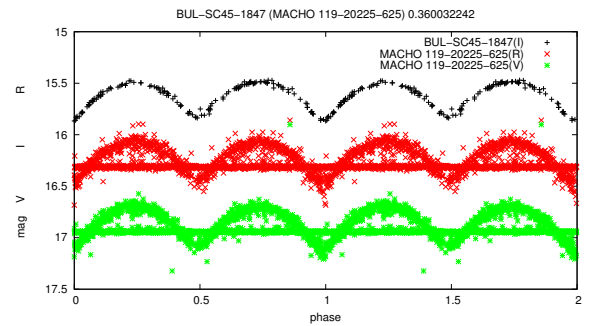


Figura 6.72: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1847 y su contrapartida MACHO 119-20225-625.

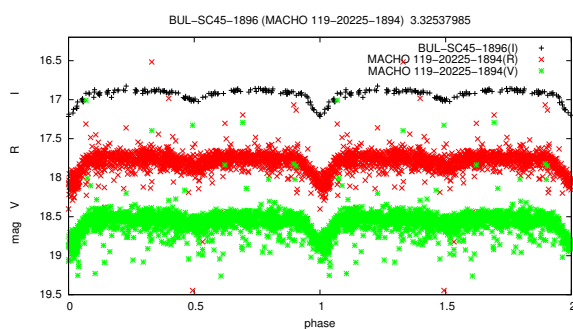


Figura 6.73: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1896 y su contrapartida MACHO 119-20225-1894.

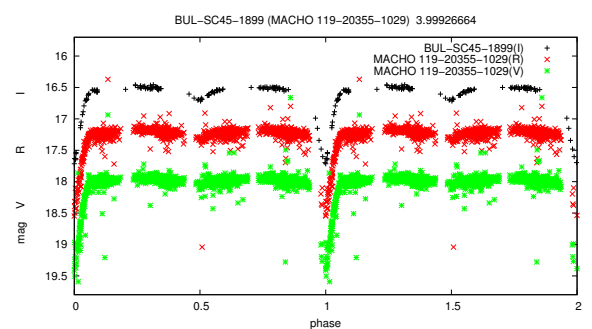


Figura 6.74: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1899 y su contrapartida MACHO 119-20355-1029.

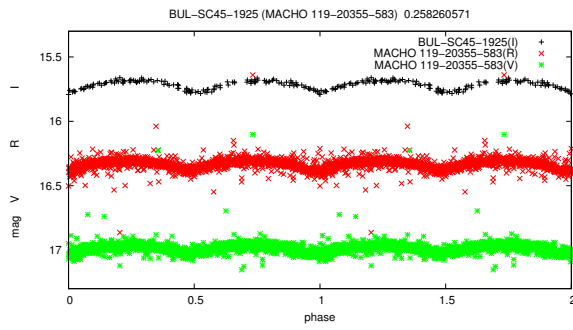


Figura 6.75: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1925 y su contrapartida MACHO 119-20355-583.

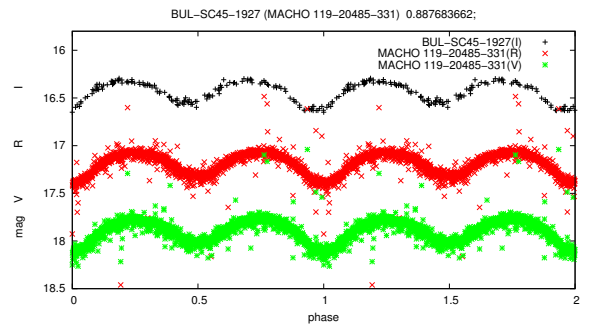


Figura 6.76: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1927 y su contrapartida MACHO 119-20485-331.

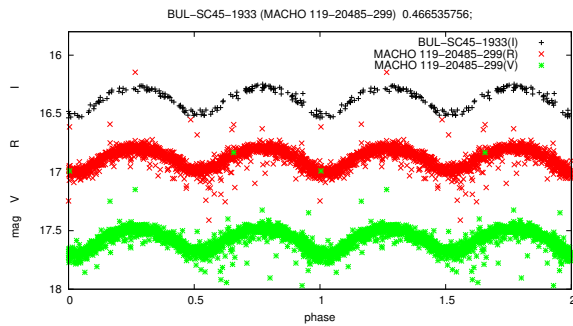


Figura 6.77: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1933 y su contrapartida MACHO 119-20485-299.

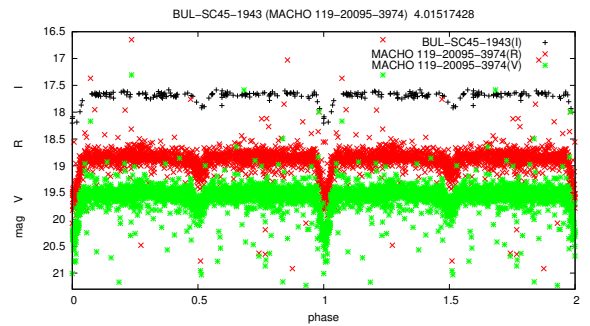


Figura 6.78: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1943 y su contrapartida MACHO 119-20095-3974.

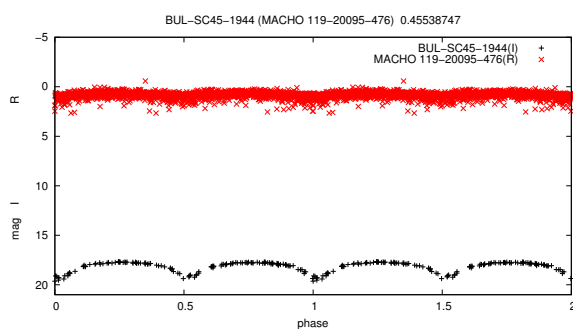


Figura 6.79: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1944 y su contrapartida MACHO 119-20095-476.

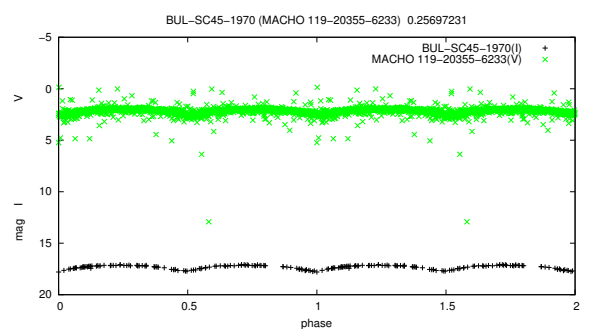


Figura 6.80: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-1970 y su contrapartida MACHO 119-20355-6233.

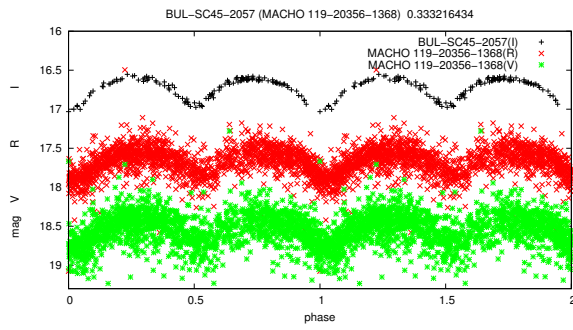


Figura 6.81: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2057 y su contrapartida MACHO 119-20356-1368.

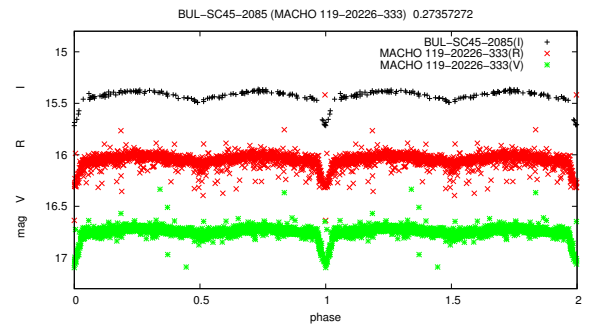


Figura 6.82: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2085 y su contrapartida MACHO 119-20226-333.

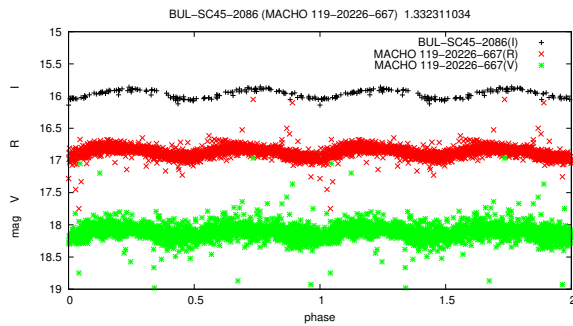


Figura 6.83: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2086 y su contrapartida MACHO 119-20226-667.

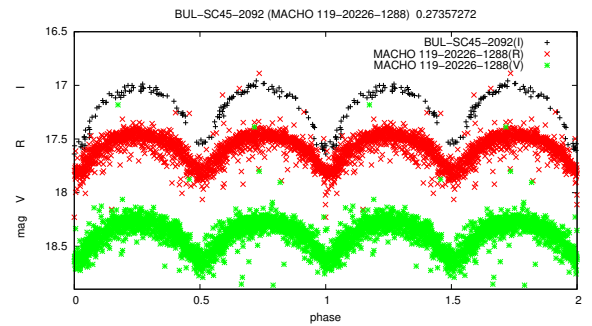


Figura 6.84: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2092 y su contrapartida MACHO 119-20226-1288.

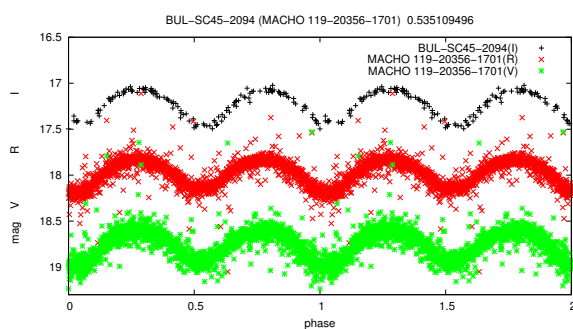


Figura 6.85: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2094 y su contrapartida MACHO 119-20356-1701.

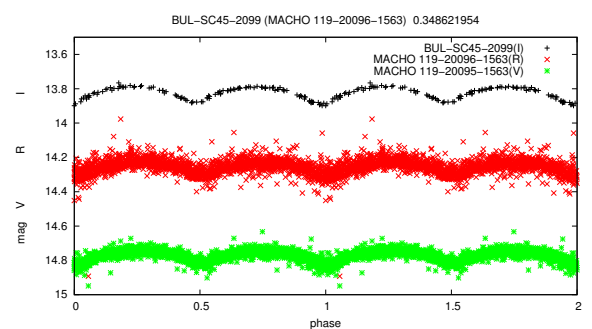


Figura 6.86: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2099 y su contrapartida MACHO 119-20096-1563.

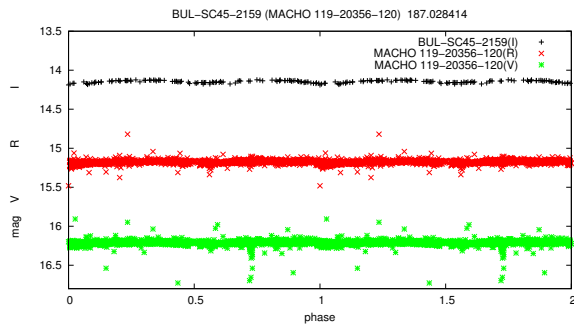


Figura 6.87: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2159 y su contrapartida MACHO 119-20356-120.

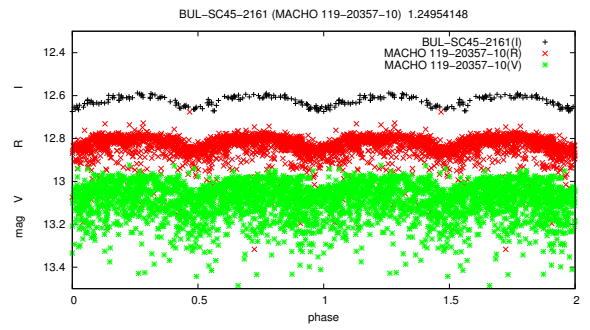


Figura 6.88: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2161 y su contrapartida MACHO 119-20357-10.

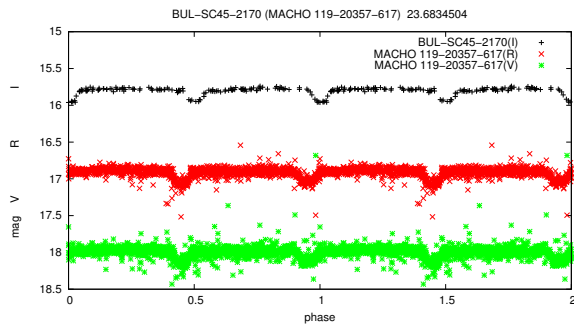


Figura 6.89: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2170 y su contrapartida MACHO 119-20357-617.

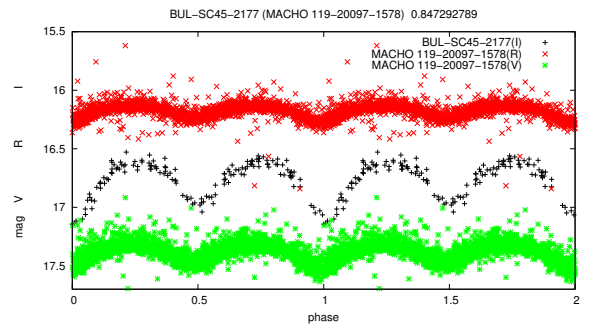


Figura 6.90: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2177 y su contrapartida MACHO 119-20097-1578.

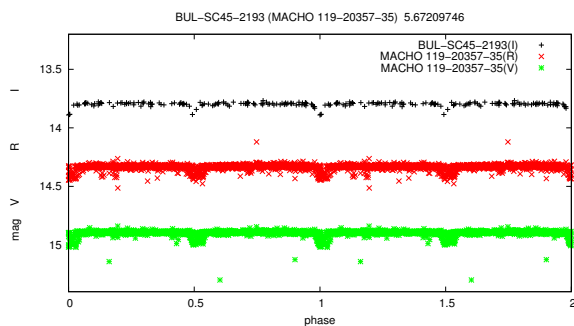


Figura 6.91: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2193 y su contrapartida MACHO 119-20357-35.

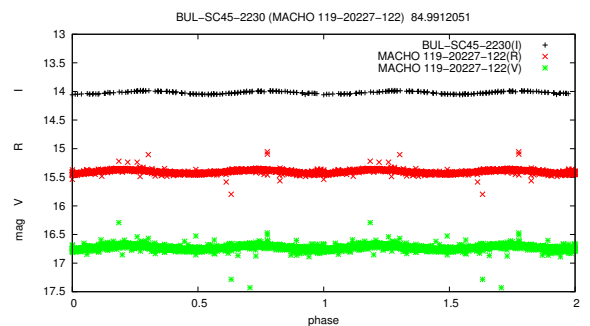


Figura 6.92: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2230 y su contrapartida MACHO 119-20227-122.

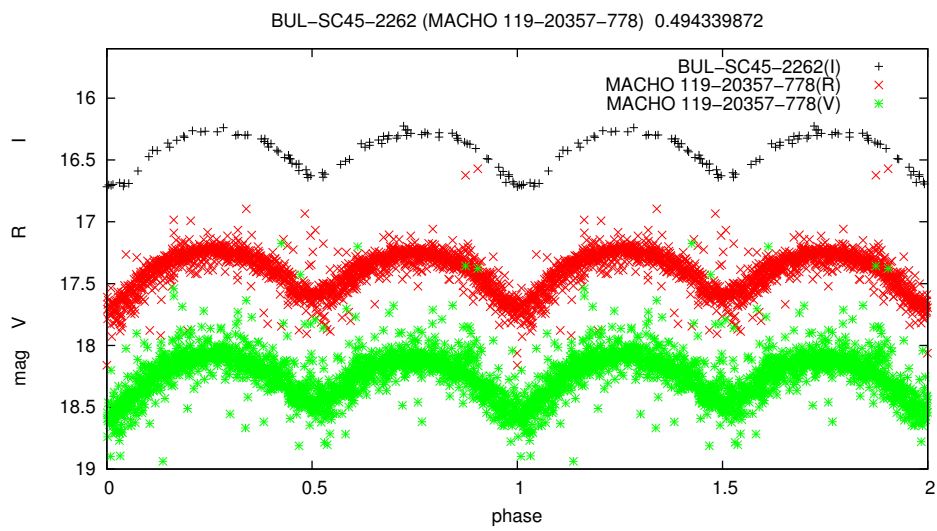


Figura 6.93: Curva de luz de la estrella binaria eclipsante OGLE BUL-SC45-2262 y su contrapartida MACHO 119-20357-778.



# Bibliografía

- [1] J. Andersen. Accurate masses and radii of normal stars. , 3:91–126, 1991.
- [2] T. S. Axelrod, R. A. Allsman, P. J. Quinn, D. P. Bennett, K. C. Freeman, B. A. Peterson, A. W. Rodgers, C. Alcock, K. H. Cook, D. R. Alves, K. Griest, S. L. Marshall, M. R. Pratt, C. W. Stubbs, and W. Sutherland. The MACHO Data Pipeline. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, volume 27 of *Bulletin of the American Astronomical Society*, page 1390, December 1995.
- [3] E. Bohm-Vitense. Book-Review - Introduction to Stellar Astrophysics - V.3 - Stellar Structure and Evolution. *Journal of the British Astronomical Association*, 102:109, April 1992.
- [4] J. M. Carrasco, D. W. Evans, P. Montegriffo, C. Jordi, F. van Leeuwen, M. Riello, H. Voss, F. De Angeli, G. Busso, C. Fabricius, C. Cacciari, M. Weiler, E. Pancino, A. G. A. Brown, G. Holland, P. Burgess, P. Osborne, G. Altavilla, M. Gebran, S. Ragaini, S. Galleti, G. Cocozza, S. Marinoni, M. Bellazzini, A. Bragaglia, L. Federici, and L.úñez@. Gaia Data Release 1. Principles of the photometric calibration of the G band. , 595:A7, November 2016.
- [5] K.-Y. Chen and E. G. Reuning. Infrared photometry of beta Persei. , 71:283–296, May 1966.
- [6] J. Debosscher, L. M. Sarro, M.ópez@, M. Deleuil, C. Aerts, M. Auvergne, A. Baglin, F. Baudin, M. Chadid, S. Charpinet, J. Cuypers, J. De Ridder, R. Garrido, A. M. Hubert, E. Janot-Pacheco, L. Jorda, A. Kaiser, T. Kallinger, Z. Kollath, C. Maceroni, P. Mathias, E. Michel, C. Moutou, C. Neiner, M. Ollivier, R. Samadi, E. Solano, C. Surace, B. Vandebussche, and W. W. Weiss. Automated supervised

- classification of variable stars in the CoRoT programme. Method and application to the first four exoplanet fields. , 506:519–534, October 2009.
- [7] A. Deras, L. L. Kiss, and T. R. Bedding. Eclipsing Binaries in the MACHO Database: New Periods and Classifications for 3031 Systems in the Large Magellanic Cloud. , 663:249–257, July 2007.
- [8] J. Devor. Solutions for 10,000 Eclipsing Binaries in the Bulge Fields of OGLE II Using DEBiL. , 628:411–425, July 2005.
- [9] A. Dolzan. Photoelectric B and V Observations of W UMa. *Information Bulletin on Variable Stars*, 3177, April 1988.
- [10] A. J. Drake, M. J. Graham, S. G. Djorgovski, M. Catelan, A. A. Mahabal, G. Torrealba, D. ía-Álvarez@, C. Donalek, J. L. Prieto, R. Williams, S. Larson, E. Christensen, V. Belokurov, S. E. Koposov, E. Beshore, A. Boattini, A. Gibbs, R. Hill, R. Kowalski, J. Johnson, and F. Shelly. The Catalina Surveys Periodic Variable Star Catalog. , 213:9, July 2014.
- [11] M. M. Dworetzky. A period-finding method for sparse randomly spaced observations of 'How long is a piece of string?'. , 203:917–924, June 1983.
- [12] <ftp://bulge.princeton.edu/ogle/ogle2/bulgediavariables>.
- [13] E. Garcia-Melendo and A. A. Henden. NSV 03199: AN Eclipsing Binary System in Auriga. *Information Bulletin on Variable Stars*, 4546, January 1998.
- [14] J. S. Glasby. *Variable stars*. 1968.
- [15] E. F. Guinan, I. Ribas, E. L. Fitzpatrick, Á. énez@, C. Jordi, G. P. McCook, and D. M. Popper. Eclipsing Binaries as Astrophysical Laboratories: Internal Structure, Core Convection, and Evolution of the B-Star Components of V380 Cygni. , 544:409–422, November 2000.
- [16] <http://astrogea.org/variabl<sub>e</sub>cl/betaper.htm>.
- [17] <http://macho.nci.org.au/>.
- [18] <http://sci.esa.int/gaia/>.

- [19] <https://en.wikipedia.org/wiki/CoRoT>.
- [20] <http://www.astrouw.edu.pl/asas/?page=highlights>.
- [21] [http://www.surastronomico.com/variable-19-nsv\\_233.html](http://www.surastronomico.com/variable-19-nsv_233.html).
- [22] P. N. Kholopov. *General Catalogue of Variable Stars*. 1987.
- [23] P. N. Kholopov. *General catalogue of variable stars. Vol.4: Reference tables*. 1990.
- [24] No. 6. 88. 1976. Kirchner, R.P. *Sci. Am.* 235.
- [25] A. Kunder and B. Chaboyer. Metallicity Analysis of MACHO Galactic Bulge RR0 Lyrae Stars from their Light Curves. , 136:2441–2452, December 2008.
- [26] C.-H. Lee. Properties of eclipsing binaries from all-sky surveys - II. Detached eclipsing binaries in Catalina Sky Surveys. , 454:2946–2953, December 2015.
- [27] C. Maceroni. Binaries as Astrophysical Laboratories: an Overview. In C. Aerts and C. Sterken, editors, *Astrophysics of Variable Stars*, volume 349 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 41, April 2006.
- [28] E. Novotny. *Introduction to stellar atmospheres and interiors*. 1973.
- [29] B. Paczynski, K. Z. Stanek, A. Udalski, M. Szymanski, J. Kaluzny, M. Kubiak, M. Mateo, W. Krzeminski, and G. W. Preston. The Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE). In *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, volume 27 of *Bulletin of the American Astronomical Society*, page 1302, December 1995.
- [30] P. Pietrukowicz, P.ó@, I.ński@, A. Udalski, R. Poleski, M. K. Szymański, M. Kubiak, G.ński@, Ł. Wyrzykowski, K. Ulaczyk, S.łowski@, and J. Skowron. Eclipsing Binary Stars in the OGLE-III Galactic Disk Fields. , 63:115–133, June 2013.
- [31] N. Pogson. Magnitudes of Thirty-six of the Minor Planets for the first day of each month of the year 1857. , 17:12–15, November 1856.
- [32] O. R. Pols, C. A. Tout, K.-P. Schroder, P. P. Eggleton, and J. Manners. Further critical tests of stellar evolution by means of double-lined eclipsing binaries. , 289:869–881, August 1997.

- [33] P. Popowski, K. Griest, C. L. Thomas, K. H. Cook, D. P. Bennett, A. C. Becker, D. R. Alves, D. Minniti, A. J. Drake, C. Alcock, R. A. Allsman, T. S. Axelrod, K. C. Freeman, M. Geha, M. J. Lehner, S. L. Marshall, C. A. Nelson, B. A. Peterson, P. J. Quinn, C. W. Stubbs, W. Sutherland, T. Vandehei, D. Welch, and MACHO Collaboration. Microlensing Optical Depth toward the Galactic Bulge Using Clump Giants from the MACHO Survey. , 631:879–905, October 2005.
- [34] A.ša@, N. Batalha, R. W. Slawson, L. R. Doyle, W. F. Welsh, J. A. Orosz, S. Seager, M. Rucker, K. Mjaseth, S. G. Engle, K. Conroy, J. Jenkins, D. Caldwell, D. Koch, and W. Borucki. Kepler Eclipsing Binary Stars. I. Catalog and Principal Characterization of 1879 Eclipsing Binaries in the First Data Release. , 141:83, March 2011.
- [35] K.-P. Schroder, O. R. Pols, and P. P. Eggleton. A critical test of stellar evolution and convective core ‘overshooting’ by means of zeta Aurigae systems. , 285:696–710, March 1997.
- [36] M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, M. D. Weinberg, S. Schneider, J. M. Carpenter, C. Beichman, R. Capps, T. Chester, J. Elias, J. Huchra, J. Liebert, C. Lonsdale, D. G. Monet, S. Price, P. Seitzer, T. Jarrett, J. D. Kirkpatrick, J. E. Gizis, E. Howard, T. Evans, J. Fowler, L. Fullmer, R. Hurt, R. Light, E. L. Kopan, K. A. Marsh, H. L. McCallon, R. Tam, S. Van Dyk, and S. Wheelock. The Two Micron All Sky Survey (2MASS). , 131:1163–1183, February 2006.
- [37] I.ński@, A. Udalski, P. Pietrukowicz, M. K. Szymański, M. Kubiak, G.ński@, L. Wyrzykowski, K. Ulaczyk, R. Poleski, and S.łowski@. The Optical Gravitational Lensing Experiment. The OGLE-III Catalog of Variable Stars. XIV. Classical and TypeII Cepheids in the Galactic Bulge. , 61:285–301, December 2011.
- [38] I.ński@, A. Udalski, M. K. Szymański, M. Kubiak, G.ński@, L. Wyrzykowski, K. Ulaczyk, R. Poleski, S.łowski@, P. Pietrukowicz, and J. Skowron. The Optical Gravitational Lensing Experiment. The OGLE-III Catalog of Variable Stars. XV. Long-Period Variables in the Galactic Bulge. , 63:21–36, March 2013.
- [39] I.ński@, A. Udalski, M. K. Szymański, P. Pietrukowicz, P.óz@, J. Skowron, S.łowski@, R. Poleski, D. Skowron, G.ński@, L. Wyrzykowski, K. Ulaczyk, and M. Kubiak. Over

- 38000 RR Lyrae Stars in the OGLE Galactic Bulge Fields. , 64:177–196, September 2014.
- [40] J. Tello and F. Jablonski. Search for Eclipsing Binaries towards the Galactic Bulge with OGLE-II and 2MASS Data. In *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, volume 35 of *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica*, vol. 27, pages 119–120, May 2009.
- [41] G. Torres and I. Ribas. Absolute Dimensions of the M-Type Eclipsing Binary YY Geminorum (Castor C): A Challenge to Evolutionary Models in the Lower Main Sequence. , 567:1140–1165, March 2002.
- [42] W. van Hamme, R. E. Wilson, and E. F. Guinan. Periodic Light Curve Changes for Beta Lyrae. , 110:1350, September 1995.
- [43] P. R. Wozniak, A. Udalski, M. Szymanski, M. Kubiak, G. Pietrzynski, I. Soszynski, and K. Zebrun. Difference Image Analysis of the OGLE-II Bulge Data. III. Catalog of 200000 Candidate Variable Stars. , 52:129–142, June 2002.