

# 1

## Detección fotométrica de exoplanetas por sus tránsitos

**Ricard Casas, Enric Forné, Ramón Costa, Xavier Puig, Joan Bel, Hilari Pallarés, Jordi Presa, Raimon Reginaldo y Montserrat Ribell**  
(Agrupación Astronómica de Sabadell)

### Resumen / Abstract

**Objetivos:** No hace mucho que el registro de tránsitos de exoplanetas está en el punto de mira de los astrónomos amateurs. Desde el verano de 2007 miembros de la Agrupación Astronómica de Sabadell han conseguido registrar diez tránsitos de seis exoplanetas (TrES-1b, TrES-2b, TrES-3b, XO-2b, HAT-P-3b y HAT-P-4b).

**Método:** Se ha realizado fotometría diferencial con CCD de forma continuada durante todo el tiempo del tránsito empleando filtro R de Bessel en ocho casos y sin filtro en otro. El análisis se ha realizado con el programa confeccionado para tal fin por Julio Castellano.

**Resultado:** A partir de las curvas de luz se ha estimado la caída de magnitud  $y$ , de ahí, el tamaño del planeta, corroborando en cuatro de ellos los valores publicados y discrepando, por exceso, en un 14% para TrES-1b y en un 40% en el caso de HAT-P-4b. En este último exoplaneta se ha comprobado una diferencia de en torno a tres cuartos de hora de retraso entre las predicciones y el momento observado. Así mismo, se ha hecho una estimación de la duración del tránsito en 5 h 45 m. En el caso de TrES-3b, también se ha determinado la inclinación de la órbita a partir de las dos mejores curvas, obteniendo un valor medio de  $83,9 \pm 0,6$  grados.

***Aim:** Exoplanet transits is starting to be a field of interest for amateur astronomers. Since the summer of 2007, members of the Agrupación Astronómica*

*de Sabadell have registered ten transits of 6 different exoplanets: TrES-1b, TrES-2b, TrES-3b, XO-2b, HAT-P-3b and HAT-P-4b.*

**Method:** *CCD differential photometry was performed continuously during each transit event with the Bessel R filter on eight occasions and without filter in one case. The data were analyzed using the program developed by Julio Castellano.*

**Results:** *Magnitude variation was determined from light curves, and from this, the size of the planet. The results obtained are in good agreement with those published in the literature for 4 exoplanets. In the other two cases, the obtained planet sizes vary by 14% for TrES-1b and 40% for HAT-P-4b, and are larger in both cases. In the latter case, the transit occurred 45 minutes later than the predicted time. The total duration of the transit was estimated at 5 h 45 m. In the case of TrES-3b, the inclination of the orbit was also determined using the two most accurate light curves, obtaining a value of  $83.9 \pm 0.6$  degrees.*

## Introducción

Hasta finales de agosto de 2008 eran 307 los planetas descubiertos que giran en torno a otras estrellas. De ellos, 52 realizan tránsitos por delante del planeta al que circundan, por lo que su presencia puede ser detectada por medios fotométricos. El primero en ser detectado por este método fue HD 209458b en 1999.

El problema en la detección radica en dos hechos muy concretos: por un lado la caída de magnitud es muy pequeña, de unas pocas milimagnitudes (mmag = milésimas de magnitud), lo que los hace difíciles de detectar al encontrarse inmersos en el ruido de las medidas fotométricas; y por otro lado, los eclipses no duran mucho tiempo y se reproducen a intervalos que pueden ser grandes. Por ello los periodos de traslación detectados hasta ahora son muy cortos. Casi una cuarta parte de los exoplanetas tienen periodos de traslación comprendidos entre 1 y 2 días, prácticamente un 30% entre 2 y 4, algo más de un 20% entre 4 y 6; sólo dos de ellos poseen periodos entre 6 y 10 y el único con un periodo de traslación superior a 10 días es HD17156b, con nada menos que 21.

Para que un exoplaneta pueda ser detectado por la técnica de tránsitos, el eje de su órbita debe estar inclinado con respecto a la línea de visión en

torno a  $90^\circ$ , de forma que pase por delante de la estrella. A partir de las características espectrales de la estrella anfitriona es posible suponerle un radio  $R_E$  y una masa  $M_E$  y, a partir de la profundidad del tránsito, puede realizarse una estimación del radio del planeta  $R_P$ . Mediante una suposición puramente geométrica, la relación entre el radio del planeta y el de la estrella viene dado por la ecuación

$$\frac{R_P}{R_E} = \rho = \left(1 - 10^{-\Delta m / 2.5}\right)^{1/2}$$

donde  $\Delta m$  es la variación de magnitud medida en la curva de luz del tránsito.

En el modelo geométrico que acabamos de describir no hemos tenido en cuenta el oscurecimiento hacia el borde (*limb darkening*) que muestran las estrellas, por lo que los valores del radio del exoplaneta que se obtienen son, realmente, una cota inferior al valor real. Aunque lo habitual es expresar el radio del planeta en función del radio de Júpiter, por lo que debe realizarse la transformación de la forma

$$\frac{R_P}{R_J} = \frac{R_P}{R_E} \cdot \frac{R_E}{R_S} \cdot \frac{1.390.000}{142.984}$$

La distancia entre el exoplaneta y su estrella puede determinarse a partir del periodo de traslación a través de la expresión

$$a = \left(\frac{G \cdot M_E \cdot T^2}{4\pi^2}\right)^{1/3}$$

donde  $G$  es la constante de gravitación universal y  $T$  el periodo de traslación.

Pero para ello es preciso, como mínimo, realizar dos observaciones del tránsito del mismo exoplaneta, aunque el periodo así determinado puede ser un múltiplo entero del periodo real, por lo que es preciso corroborarlo con la bibliografía existente o bien mediante la observación de otro u otros tránsitos. Debe recordarse que al comparar las curvas de luz de distintos tránsitos es preciso realizar la corrección heliocéntrica, pues la distancia Tierra-exoplaneta ha variado de una observación a otra debido a la traslación de la Tierra en torno al Sol.

Si la fotometría que se realiza poseyera la calidad suficiente, a partir de la curva de luz sería posible determinar incluso el parámetro de impacto

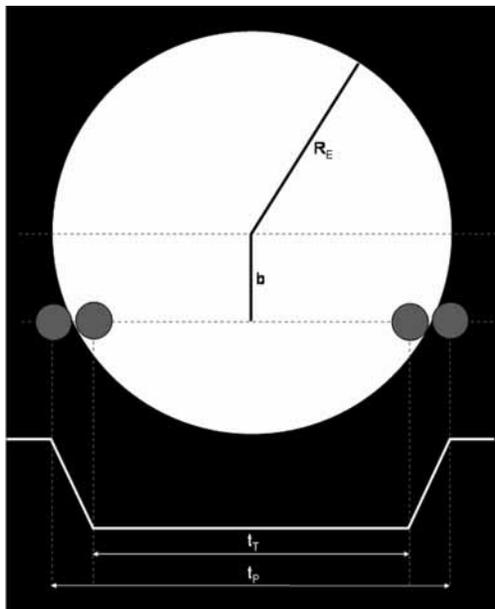


Figura 1. Esquema del tránsito de un exoplaneta en el que se muestran los distintos parámetros a tener en cuenta. Al confeccionar la curva de luz de la parte inferior no se ha tenido en cuenta el oscurecimiento del borde, de ahí la planitud de la totalidad.

del exoplaneta ( $b$ ), la fracción del radio estelar a la que pasa con respecto al centro de la estrella  $y$ , junto con la distancia exoplaneta-estrella, la inclinación de la órbita ( $i$ ).

$$b = \frac{a}{R_E} \cdot \cos(i)$$

A partir de la curva de luz (figura 1, parte inferior) puede determinarse el ángulo de inclinación de la órbita del exoplaneta respecto a la línea de visión mediante la expresión:

$$\cos(i) = \sqrt{\frac{(1 + \rho)^2 \sin^2\left(\pi \frac{t_T}{T}\right) - (1 - \rho)^2 \sin^2\left(\pi \frac{t_P}{T}\right)}{(1 - \rho)^2 \cos^2\left(\pi \frac{t_P}{T}\right) - (1 + \rho)^2 \cos^2\left(\pi \frac{t_T}{T}\right)}}$$

**Tabla 1. Equipos de observación**

Equipo	Componentes
1	Ricard Casas
2	Ricard Casas y Raimon Reginaldo
3	Enric Forné
4	Xavier Puig, Jordi Presa y Montserrat Ribell
5	Joan Bel
6	Ramón Costa

## Observaciones

Las observaciones han sido realizadas por los distintos equipos (tabla 1) en los que han participado los autores, todos ellos miembros de la Agrupación Astronómica de Sabadell.

Ricard Casas, Xavier Puig, Jordi Presa, Raimon Reginaldo y Montserrat Ribell han empleado el telescopio de 50 cm del observatorio de Sabadell en su configuración Newton a  $f/4,0$ , haciendo uso de una cámara CCD FLI-CM9 hasta diciembre de 2007 y de una SBIG-ST8XME a partir de enero de 2008. En todos los casos se ha empleado el filtro R de Bessel.

Ramon Costa ha empleado su telescopio Schmidt-Cassegrain de 23 cm a  $f/10$  situado en su albergue en los Observatorios de la Agrupación en el Montsec, empleando una cámara SBIG-ST9 y también filtro R.

Enric Forné ha realizado sus observaciones desde su observatorio privado situado en l'Ampolla (Tarragona), equipado con un telescopio Newton de 36 cm a  $f/4,5$ , con una cámara CCD Starlight SXV-H9 y filtro R de Bessel.

Joan Bel ha realizado su observación desde Barcelona con un telescopio Schmidt-Cassegrain de 25 cm a  $f/9,6$  y una cámara CCD SBIG-ST9XE sin filtro fotométrico.

Los exoplanetas observados han sido seis que se relacionan en la tabla 2, donde se indica el año de descubrimiento, sus coordenadas, magnitud V fuera del eclipse, radio de la estrella con respecto al solar y profundidad del tránsito. En la parte inferior de la tabla también se indican los elementos para calcular los tránsitos y sus duraciones.

**Tabla 2. Exoplanetas observados**

Exoplaneta	Año desc.	A.R. (2000,0)	Decl.	V	R <sub>E</sub> (R <sub>S</sub> )	Prof. (%)
TrES-1b	2004	19h 04m 10s	+36° 37' 57"	11,79	0,82	1,93
TrES-2b	2006	19h 07m 14s	+49° 18' 59"	11,41	1	1,69
TrES-3b	2007	17h 52m 07s	+37° 32' 46"	12,4	0,813	2,98
XO-2b	2007	7h 48m 07s	+50° 13' 33"	11,18	0,964	1,15
HAT-P-3b	2007	13h 44m 23s	+48° 01' 43"	11,86	0,824	1,34
HAT-P-4b	2007	15h 19m 58s	+36° 13' 47"	11,2	1,59	0,73

Exoplaneta	Estrella	Época D.J.	Periodo (días)	Total (min)
TrES-1b	GSC 2652-1324	2453898,87342 ± 0,00014	3,0300737	150
TrES-2b	GSC 3089-0929	2453957,63479 ± 0,00038	2,470621	90
TrES-3b	GSC 3549-2811	2454185,9101 ± 0,0003	1,30619	105,3
XO-2b	GSC 3413-0005	2454147,74902 ± 0,00002	2,615838	162
HAT-P-3b	GSC 3466-0819	2454218,7594	2,899703	123,5
HAT-P-4b	GSC 2569-1599	2454245,8154	3,056536	

En la toma de datos se ha procedido a adquirir varias imágenes de corriente de oscuridad con el mismo tiempo de exposición que las tomas de las estrellas, también corrientes de oscuridad con el mismo tiempo de exposición que las imágenes de respuesta del detector e imágenes de la respuesta del detector. Cada grupo de imágenes se ha promediado y las imágenes resultantes han servido para calibrar las tomas estelares.

Las imágenes estelares se han obtenido de forma continuada, utilizando tiempos de exposición que garantizasen una buena relación señal-ruido y que, por supuesto, la imagen no saturara. En algunas ocasiones la serie ha tenido que ser cortada para corregir el foco, variar el tiempo de exposición o realizar el paso del telescopio por el meridiano en el caso de las monturas ecuatoriales alemanas. Siempre se ha intentado que este tiempo fuera lo más corto posible.

En la tabla 3 se indican, para cada estrella, el equipo que ha realizado las observaciones, el número de imágenes obtenidas y el tiempo de exposición. Las figuras 2, 3, 4, 5, 6 y 7 muestran los campos de cada uno de los exoplanetas observados. Todas tienen el norte arriba y el este a la izquierda.

**Tabla 3. Observaciones**

Exoplaneta	Equipo	Fecha	Núm. de imágenes	Exp. (s)
TrES-1b	3	14/07/2008	590	20
TrES-2b	1	26/07/2007	314	30-60
TrES-2b	1	1/09/2007	188	60
TrES-3b	5	10/09/2007	368	30
TrES-3b	3	22/06/2008	308	30
TrES-3b	6	8/08/2008	130	60
XO-2b	2	6/02/2008	310	40
XO-2b	3	6/02/2008	200	10
HAT-P-3b	4	20/03/2008	279	30
HAT-P-4b	2	1/04/2008	303	60

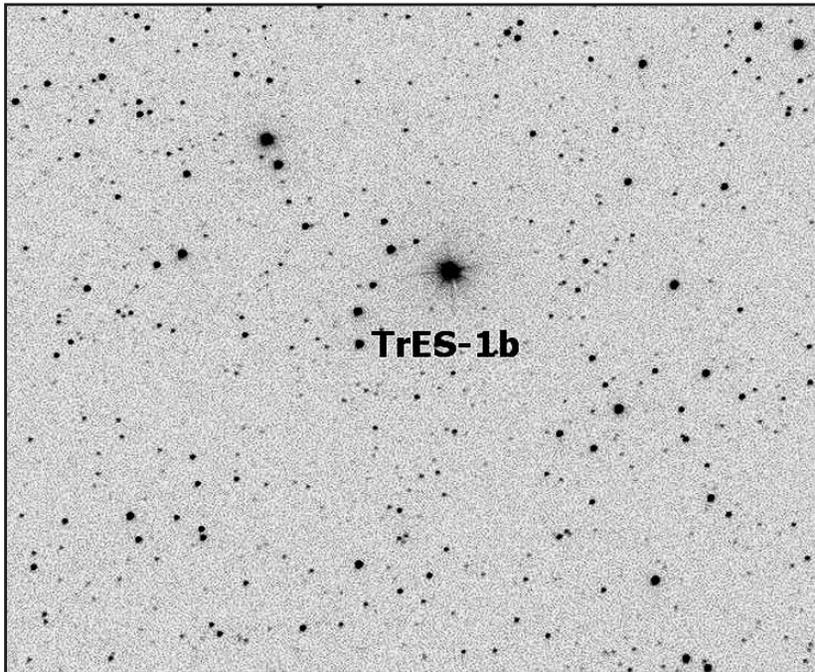


Figura 2.

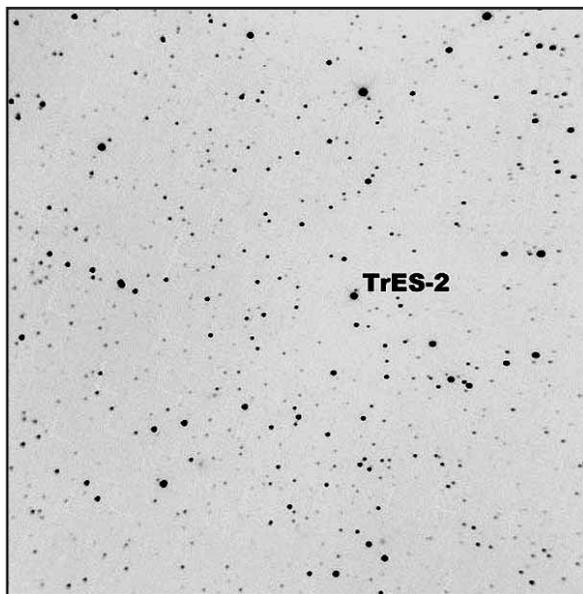


Figura 3. Campo de TrES-2b obtenido en la primera observación.

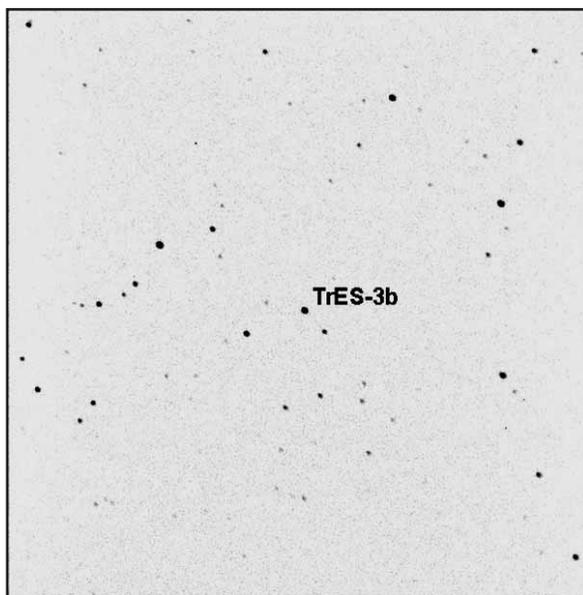


Figura 4.

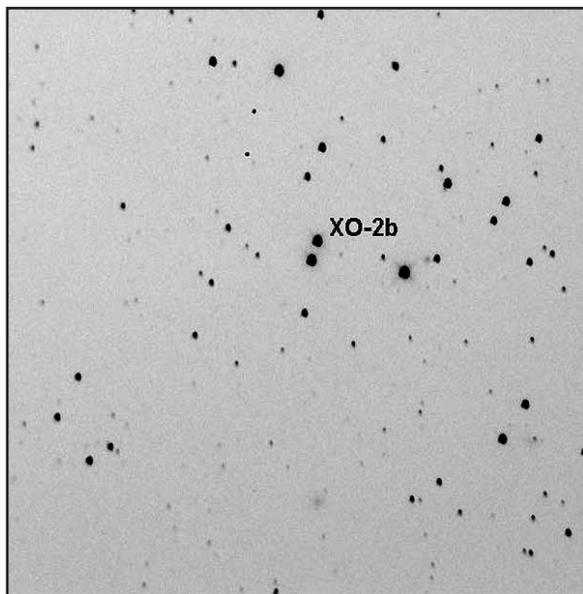


Figura 5. La estrella más brillante situada arriba en el centro es una variable no catalogada.

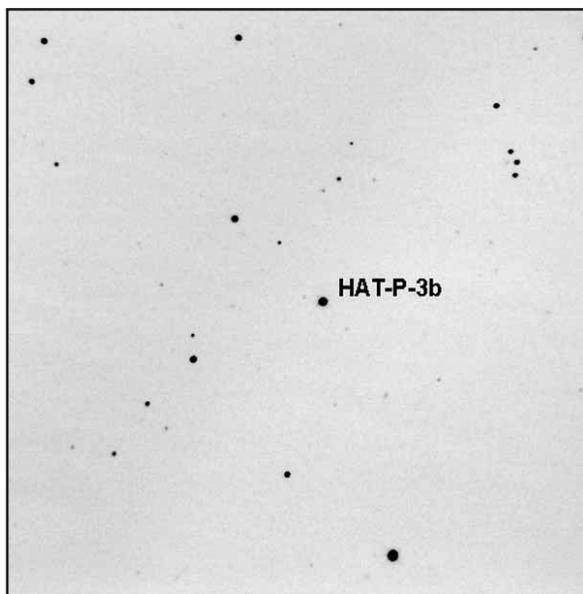


Figura 6.

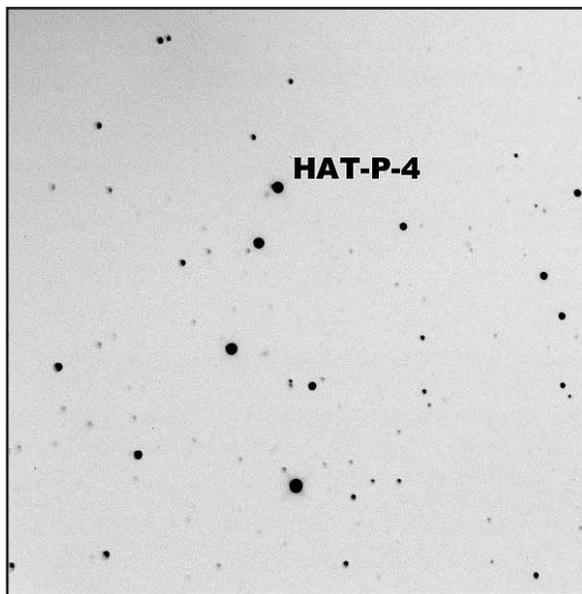


Figura 7.

## Análisis

Una vez corregidas las imágenes de corriente de oscuridad y de respuesta del detector se alinean y se procede al análisis fotométrico de todo el lote con el programa Fotodif de Julio Castellano. Este programa permite elegir varias estrellas que se utilizan como referencia fotométrica y la estrella que se quiere evaluar. Es conveniente escoger alguna o algunas estrellas que sirvan de referencia para comprobar la calidad de la serie y que ninguna de las estrellas sea, a su vez, variable, como ocurrió en el campo de XO-2b (figura 5). La magnitud que se obtiene con Fotodif no es la magnitud absoluta de la estrella, sino que está calculada para que su valor medio sea cero; por ello debe procederse con cautela al superponer las observaciones de distintas fechas u observadores.

Cuando se utiliza el programa Fotodif es conveniente probar con distintas estrellas de comparación a fin de escoger la mejor combinación, así como documentar todo lo que se está haciendo para poder reproducirlo en otras ocasiones. A la hora de configurar el programa es necesario elegir la abertura sobre la que se hará la fotometría y el anillo sobre el que se

**Tabla 4. Resultados**

Exoplaneta	Fecha	Caída (mmag)	R <sub>P</sub> (R <sub>J</sub> )
TrES-1b	14/07/2008	26 ± 3	1,23 ± 0,07
TrES-2b	26/07/2007	16 ± 6	1,18 ± 0,22
TrES-2b	1/09/2007	17 ± 7	0,99 ± 0,20
TrES-3b	22/06/2008	23 ± 4	1,14 ± 0,10
TrES-3b	8/08/2008	27 ± 2	1,24 ± 0,05
XO-2b	6/02/2008	12 ± 3	0,98 ± 0,12
XO-2b	6/02/2008	13 ± 2	1,02 ± 0,12
HAT-P-3b	20/03/2007	17 ± 3	1,00 ± 0,09
HAT-P-4b	1/04/2008	14 ± 2	1,75 ± 0,12

calculará el fondo de cielo. Por norma, la abertura debe tener un diámetro de 3–4 veces la anchura de las estrellas a media altura (*FWHM*) a fin de recoger en ella toda la señal. Con respecto al anillo, no debe contener estrellas próximas, por lo que es recomendable no escoger estrellas que tengan a otras muy cerca.

A partir del análisis con Fotodif se han obtenido las curvas de luz de las figuras 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 y 16, en las que también se ha señalado el momento medio del tránsito y el comienzo y fin de la parcialidad (salvo en el último caso debido a la importante diferencia entre la predicción y la observación) calculados a partir de los elementos indicados en la tabla 2. Lógicamente, se ha tenido en cuenta la corrección heliocéntrica.

En la tabla 4 se especifican las caídas de magnitud y el radio del exoplaneta calculado a partir de éstas.

En seis casos se ha determinado el momento medio del tránsito, mientras que la duración de la parcialidad y de la totalidad tan sólo se ha podido determinar en el caso de TrES-3b debido a la dispersión que, en general, muestran los datos de los otros tránsitos y a la falta, en algunos casos, de datos antes o después del tránsito.

## Resultados

**TrES-1b.** La profundidad del tránsito da un diámetro planetario mayor

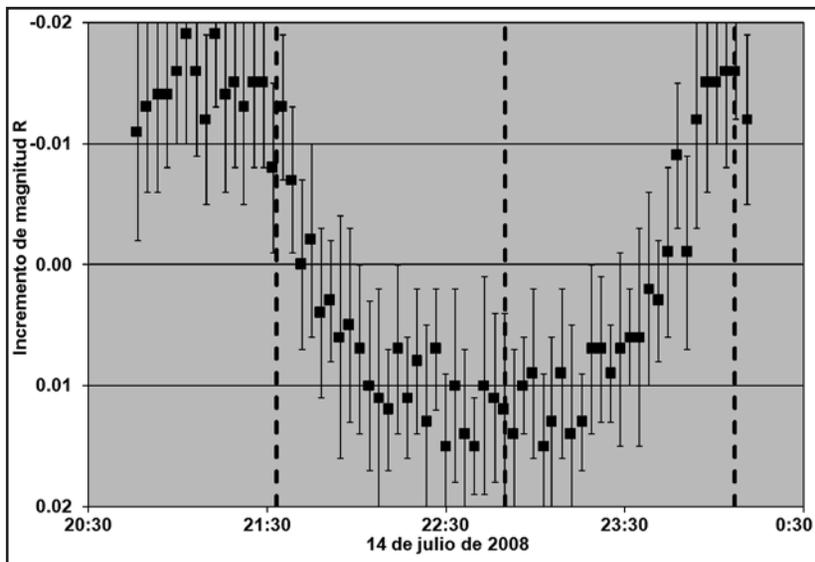


Figura 8. Tránsito de TrES-1b. Las líneas verticales de trazo discontinuo indican, de izquierda a derecha, el principio del tránsito, el momento medio y el final.

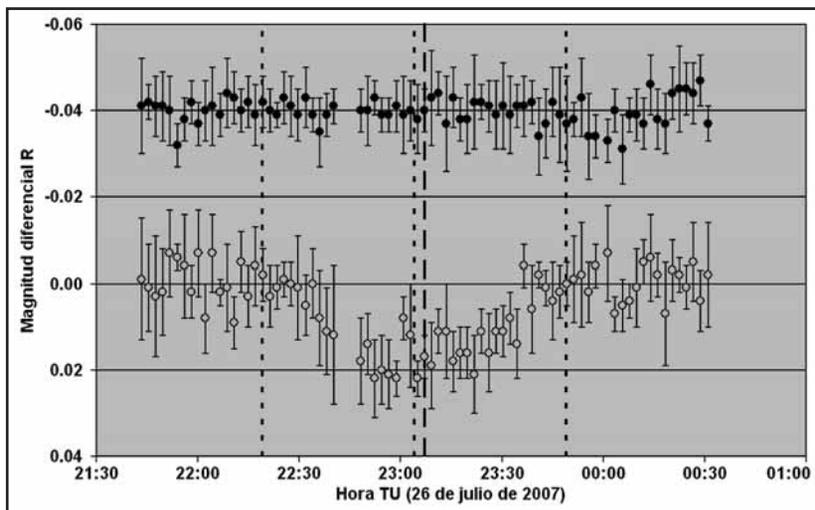


Figura 9. Tránsito de TrES-2b en la parte inferior. La curva superior es la de la estrella de comparación. La línea de trazo mayor indica el momento determinado a partir de la simetría de la curva de luz.

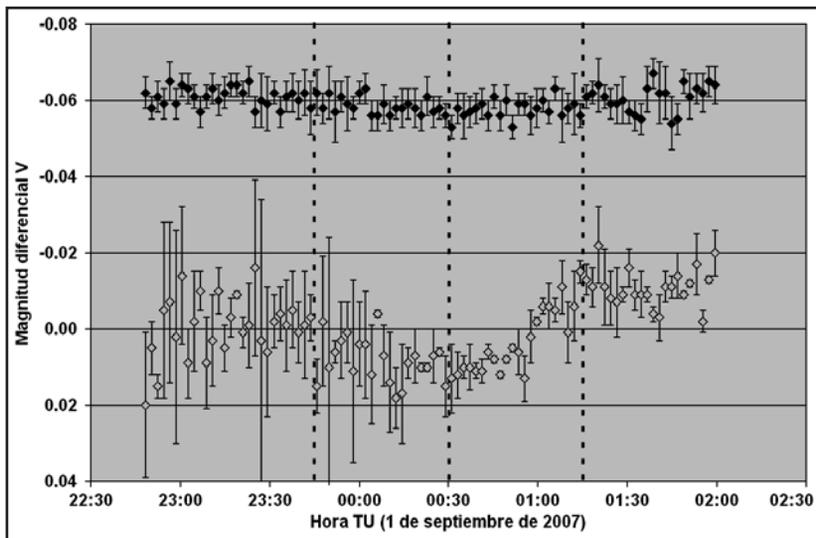


Figura 10. Segundo tránsito registrado de TrES-2b. Se aprecia el importante ruido presente en la primera mitad del eclipse debido, posiblemente, a razones meteorológicas. Las líneas verticales de trazo discontinuo indican, de izquierda a derecha, el principio del tránsito, el momento medio y el final.

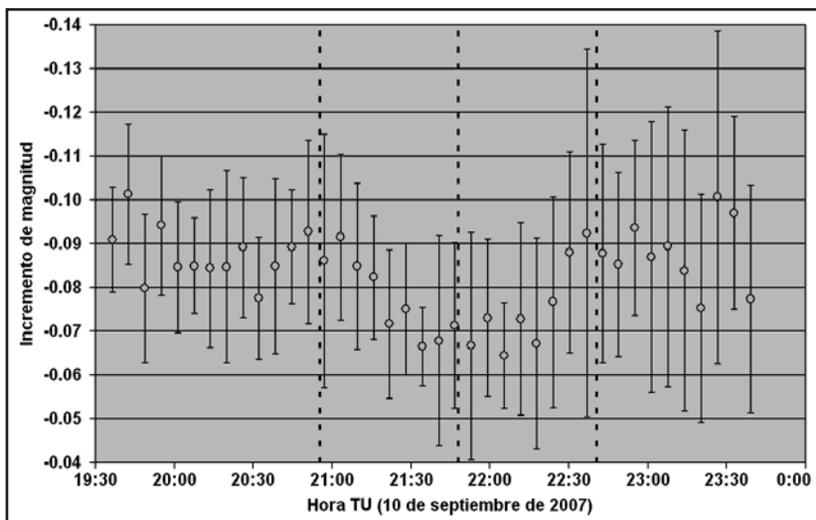


Figura 11. Tránsito de TrES-3b obtenido por Joan Bel. Las líneas verticales discontinuas indican, de izquierda a derecha, el principio del tránsito, el momento medio y el final.

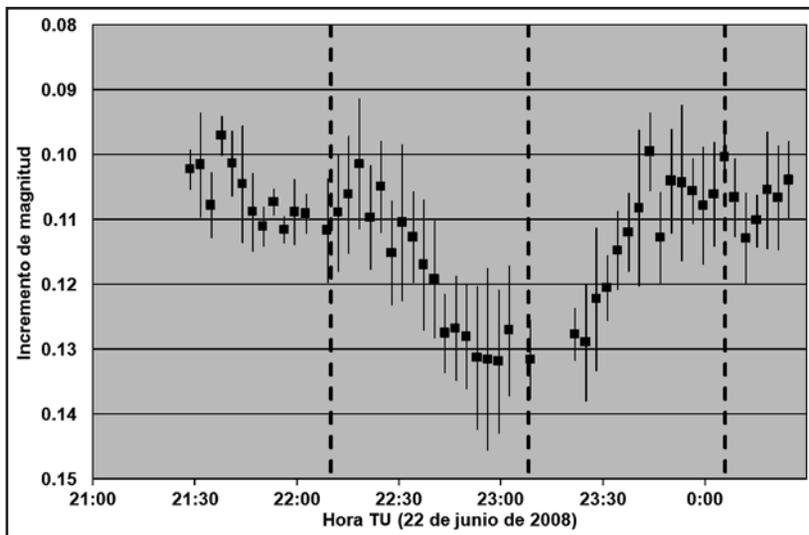


Figura 12. Tránsito de TrES-3b obtenido por Enric Forné.

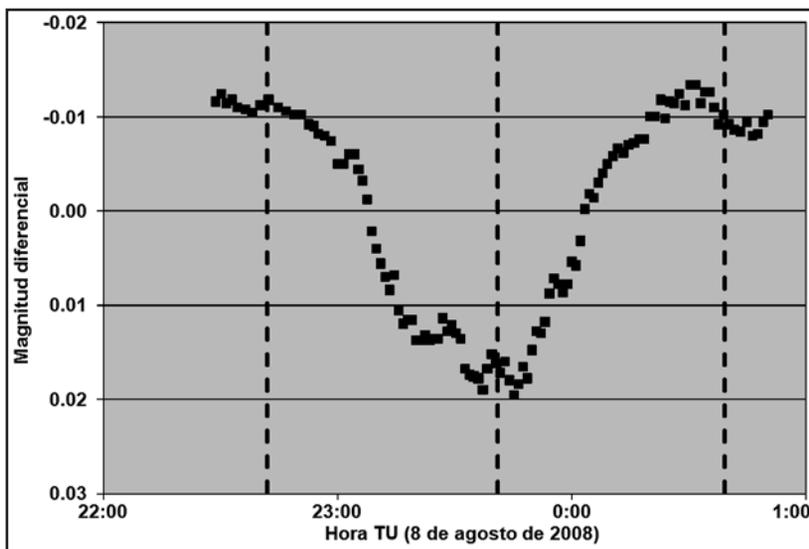


Figura 13. Tránsito de TrES-3b obtenido por Ramón Costa.

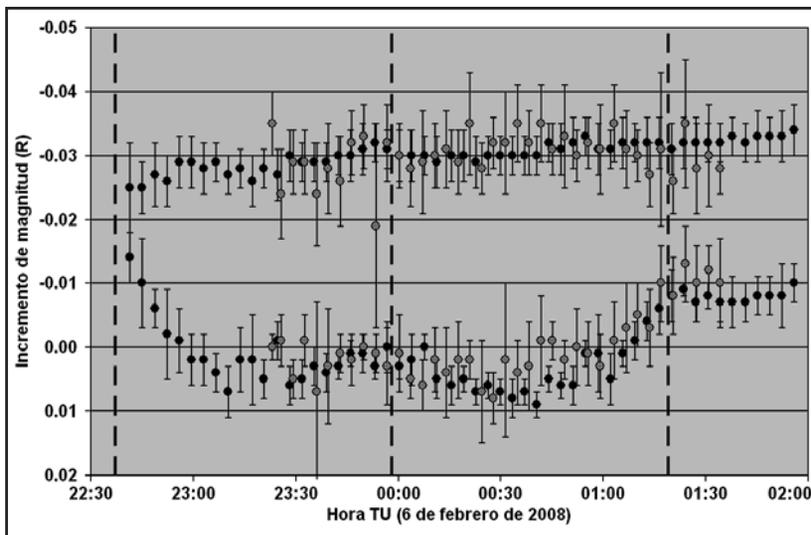


Figura 14. Tránsito de XO-2b registrado por dos equipos (Ricard Casas y Raimon Reginaldo los oscuros y Enric Forné los claros). Ninguno de los equipos pudo registrar la fase previa al tránsito, pero durante la totalidad se aprecia una ondulación que fue registrada por ambos equipos, separados unos 140 km.

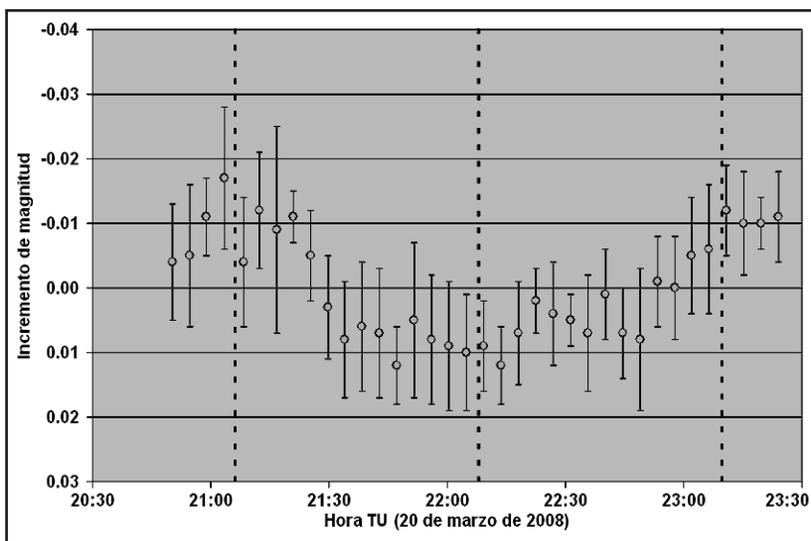


Figura 15. Tránsito de HAT-P-3b.

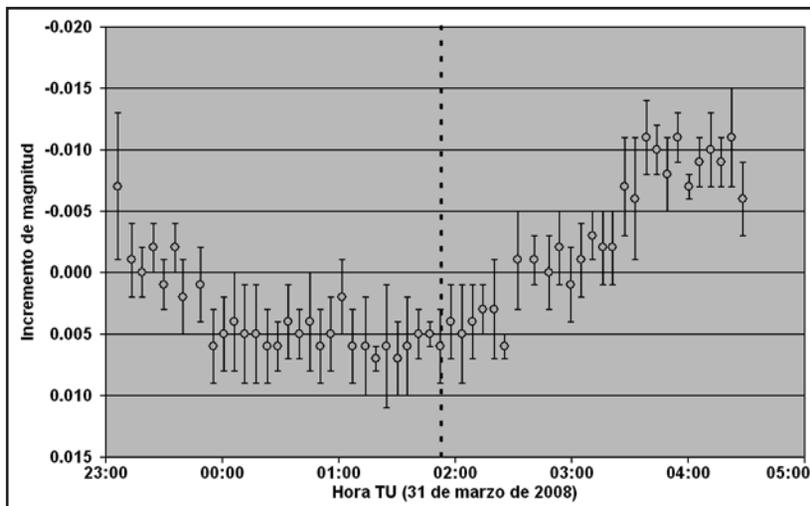


Figura 16. Tránsito de HAT-P-4b. Se aprecia la caída hacia la entrada a la totalidad al principio y el resto del tránsito. La línea vertical a trazos indica el momento esperado de la mitad del tránsito, que claramente está retrasado con respecto al momento real. El principio y final de la parcialidad no se han señalado al no disponer del tiempo de duración del tránsito.

que el publicado, por otra parte, el momento medio del tránsito se ha fijado a las 22 h 44 m, lo que equivale a 6 minutos de adelanto con respecto a la hora prevista.

**TrES-2b.** Se han registrado dos tránsitos en fechas distintas, la primera de buena calidad y la segunda de buena calidad sólo en el tramo final. A pesar de ello se ha podido establecer, además, el periodo de traslación ( $2,470467 \pm 0,000010$  días) y, a partir de él, la distancia del exoplaneta a la estrella en torno a la que gira obteniendo 5,4 millones de kilómetros.

El momento central del tránsito se ha calculado mediante la simetría que muestra la curva de luz a las 23 h 07 m TU en la primera observación, 3 minutos después de lo previsto según las efemérides.

**TrES-3b.** Se han obtenido tres curvas de luz, la primera con mucho ruido, por lo que no es posible conseguir información, mientras que de las dos restantes se ha podido obtener una excelente información debido a su gran calidad. Por un lado, se han determinado los momentos del mínimo, a las 23 h 05 m para el 22 de junio y a las 23 h 36 m para el 8

de agosto y, teniendo de referencia el periodo publicado, se ha determinado un periodo de 1,30618 días. Por otra parte, el diámetro del planeta se ha fijado en  $1,19 \pm 0,11 R_J$ , coherente con los datos publicados. También se ha estimado la duración de la parcialidad y la totalidad del tránsito permitiendo establecer una inclinación de la órbita de  $83,9 \pm 0,6^\circ$ , ligeramente superior a los valores publicados ( $82,2^\circ$ ). Cabe señalar que la curva obtenida por Ramón Costa el 8 de agosto presenta una caída dentro del mínimo un tanto sospechosa, lo cual, ligado a la diferente profundidad de las otras dos curvas obtenidas, hace necesario un mayor seguimiento de este exoplaneta.

**XO-2b.** En este caso fueron dos los equipos que registraron simultáneamente el tránsito, mostrando un acuerdo importante. El momento medio del tránsito se puede establecer a las 0 h 00 m TU. Cabe señalar que en ambas observaciones no se aprecia una totalidad plana, sino con una giba simétrica con respecto al momento medio.

**HAT-P-3b.** Tránsito bastante centrado con respecto a lo esperado, pero con un ruido importante.

**HAT-P-4b.** A partir de la simetría de la curva de luz (incompleta) puede inferirse que el momento central del tránsito fue en torno a la 1 h 05 m TU, mientras que el momento esperado era a la 1 h 53 m TU (el tránsito se produjo 48 minutos antes de la hora prevista). A partir de la rama ascendente se puede estimar que la duración total del tránsito fue de 5 h 45 m. Y, finalmente, la profundidad del tránsito fue 6 mmag, mayor que el valor esperado, lo que hace que el radio del planeta se haya evaluado un 40% mayor que en valores publicados.

## Bibliografía

Alonso, Roi. *Tesis doctoral* (2006).

Castellano, Julio

<http://www.astrosurf.com/cometas/extrasolares/fotodif/fotodif.htm>

*La Enciclopedia de los Planetas Extrasolares.* <http://www.exoplanet.eu/>