EL ESPECTRÓGRAFO ANDES PARA EL ELT; LA BÚSQUEDA DE UNA SEGUNDA TIERRA

Enric Pallé

En las últimas décadas hemos descubierto miles de planetas alrededor de otras estrellas. El siguiente gran reto ya no consiste únicamente en encontrarlos, sino en conocer sus propiedades físicas y, sobre todo, sus atmósferas. Entre todos los mundos detectados, nos interesan especialmente aquellos que se parecen a la Tierra en tamaño y masa. La pregunta inmediata es si conservan una atmósfera y, en caso afirmativo, cuál es su composición.

El objetivo más ambicioso es buscar posibles indicios de vida, pero antes debemos responder cuestiones más elementales: ¿tienen estos planetas una envoltura gaseosa?, ¿se parece a la de la Tierra, a la de Venus o a ninguna de ellas?, ¿qué condiciones físicas reinan allí? Para abordar estas preguntas estamos preparando ANDES, un espectrógrafo de muy alta resolución destinado al Extremely Large Telescope (ELT), y desarrollando técnicas de análisis dentro del proyecto SPIR en el Instituto de Astrofísica de Canarias.

Las atmósferas son una fuente de información extraordinaria. Su composición puede conservar pistas sobre la formación y la migración de los planetas. También permite investigar si un mundo ha perdido una atmósfera primordial, rica en hidrógeno y helio, o si ha desarrollado posteriormente una atmósfera secundaria. En los planetas rocosos, estas medidas podrían ayudarnos a evaluar las condiciones de habitabilidad.

Qué nos revela la espectroscopía de transmisión

Una parte de los exoplanetas pasa periódicamente por delante de su estrella, visto desde la Tierra. Durante ese tránsito, una pequeña fracción de la luz estelar atraviesa la atmósfera del planeta antes de llegar hasta nosotros. Las moléculas presentes absorben determinadas longitudes de onda y, por tanto, el planeta parece tener un tamaño ligeramente distinto según el color observado.

Midiendo con precisión la profundidad del tránsito a diferentes longitudes de onda reconstruimos un espectro de transmisión. Las variaciones que aparecen en él nos informan sobre la presencia de compuestos químicos. Esta técnica es particularmente favorable para planetas grandes, calientes y con atmósferas extensas, pero resulta mucho más difícil cuando intentamos aplicarla a cuerpos de tamaño terrestre.

En los gigantes gaseosos, la espectroscopía atmosférica se ha convertido en una herramienta consolidada. El problema surge al pasar a planetas pequeños: la capa atmosférica que atraviesa la luz es muy delgada y la señal que buscamos puede quedar varios órdenes de magnitud por debajo de la que observamos en un Júpiter caliente.

Lo que ha conseguido el telescopio espacial James Webb

El lanzamiento del telescopio espacial James Webb, en diciembre de 2021, marcó un punto de inflexión en el estudio de atmósferas exoplanetarias. Una de sus primeras observaciones de referencia fue la del planeta WASP-39 b, un gigante gaseoso muy hinchado, de baja

densidad y con un periodo orbital de apenas cuatro días. Su atmósfera extensa facilita la detección de señales espectrales.

El Webb ha permitido identificar compuestos como dióxido de carbono y dióxido de azufre en atmósferas de planetas gigantes. También ha abierto una ventana a los subneptunos, planetas con radios aproximados de entre 1,5 y 4 veces el terrestre, muy abundantes entre los exoplanetas conocidos y sin equivalente directo en nuestro Sistema Solar.

En estos mundos pueden existir configuraciones físicas muy diferentes: núcleos rocosos rodeados de gruesas envolturas de hidrógeno, grandes cantidades de agua o estructuras intermedias. En objetos como K2-18 b se han estudiado señales atribuidas a moléculas como el metano y el dióxido de carbono. Sin embargo, diferentes modelos atmosféricos pueden producir espectros parecidos, y algunas interpretaciones, especialmente las relacionadas con posibles biofirmas, siguen siendo controvertidas.

Cuando descendemos hasta planetas del tamaño de la Tierra, las limitaciones son mucho más severas. Los datos actuales pueden descartar en ciertos casos atmósferas muy extendidas de hidrógeno y helio, pero no siempre permiten distinguir entre un planeta sin atmósfera y otro con una atmósfera más compacta, como las de la Tierra o Venus. Además, las variaciones de la propia estrella pueden imitar o enmascarar señales planetarias.

El ELT: un telescopio de 39 metros

Para dar el siguiente salto de sensibilidad se está construyendo el Extremely Large Telescope, de 39 metros de diámetro, en Chile. Su espejo primario estará formado por 798 segmentos que deberán trabajar como una única superficie óptica. Se trata de un sistema de enorme complejidad, con varios espejos sucesivos y óptica adaptativa para compensar las perturbaciones introducidas por la atmósfera terrestre.

Uno de sus espejos, el cuaternario, tendrá unos 2,4 metros y podrá deformarse con gran rapidez para corregir las distorsiones atmosféricas. La puesta en marcha exigirá un proceso cuidadoso de alineación, ajuste de fases y verificación de los instrumentos. En el calendario expuesto durante la conferencia se preveía una primera luz técnica hacia 2028 y la entrada progresiva en funcionamiento de los instrumentos científicos durante los primeros años de la década de 2030.

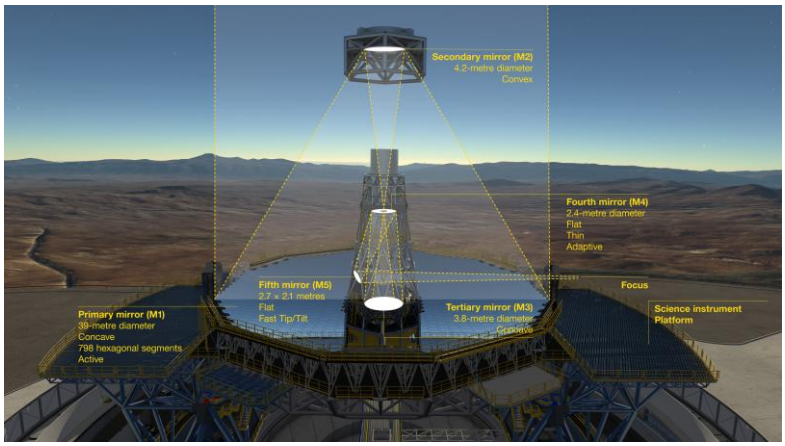

Figura 1. Sistema de espejos del ELT

El ELT aportará dos ventajas fundamentales. La primera será su extraordinaria capacidad para recoger fotones: una señal extremadamente débil podrá estudiarse con una sensibilidad muy superior a la de los telescopios actuales. La segunda será su gran resolución angular, especialmente cuando trabaje con óptica adaptativa. Ambas propiedades resultarán esenciales para observar exoplanetas.

Además, un telescopio terrestre permite instalar espectrógrafos de gran tamaño en salas especializadas y conducir hasta ellos la luz mediante fibras ópticas. Esto facilita alcanzar resoluciones espectrales muy elevadas, del orden de 100.000, como las previstas para ANDES.

Por qué es tan importante la alta resolución espectral

La alta resolución permite aprovechar el efecto Doppler para separar la señal de un planeta de la de su estrella. Durante su movimiento orbital, las líneas de absorción asociadas al planeta cambian ligeramente de longitud de onda. La señal estelar, en cambio, sigue un comportamiento diferente. Si registramos espectros sucesivos y tenemos en cuenta ese desplazamiento, podemos alinear y combinar las débiles señales planetarias.

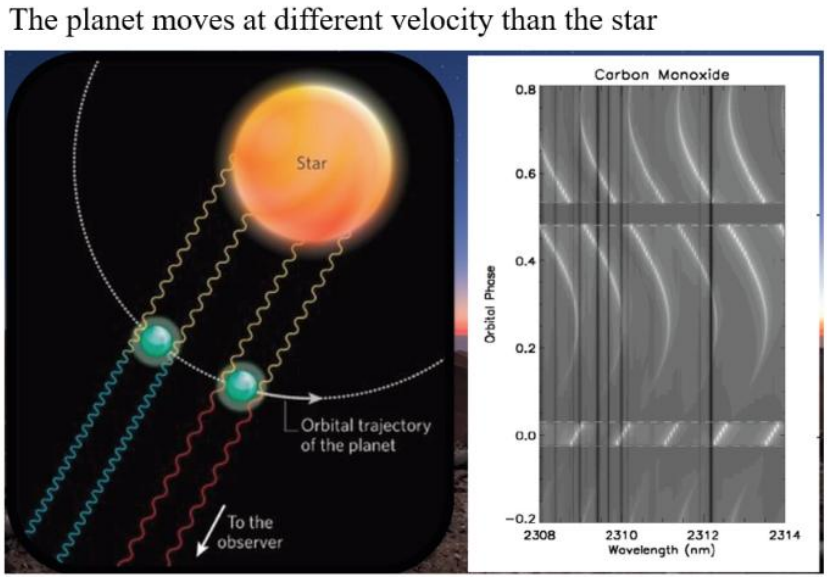

Figura 2. Diferencias entre el efecto Doppler de una estrella y de su planeta

Imaginemos una atmósfera con sodio o monóxido de carbono. Sus líneas espectrales se desplazan a medida que el planeta se mueve alrededor de la estrella. En un tránsito primario, la luz estelar atraviesa la atmósfera y puede reforzar esas absorciones. En un eclipse secundario, cuando el planeta pasa por detrás de la estrella, la contribución planetaria desaparece. La comparación de estas situaciones permite aislar componentes que, de otro modo, quedarían ocultos en el espectro total.

La ventaja no se limita a identificar moléculas. La forma y la anchura de las líneas contienen información sobre temperaturas, presiones y velocidades. Por ejemplo, el perfil de una línea de helio puede aportar datos sobre gases que escapan de una atmósfera. Del mismo modo, los desplazamientos Doppler pueden revelar vientos y movimientos en diferentes capas atmosféricas. La alta resolución nos abre, por tanto, la posibilidad de estudiar la dinámica y no solo la composición de otros mundos.

ANDES: un instrumento diseñado para exoplanetas

ANDES es un proyecto internacional en el que participan numerosos institutos europeos. Su construcción requiere una inversión importante, tanto en componentes como en el trabajo de cientos de especialistas. El instrumento reunirá varios canales espectroscópicos y ofrecerá una amplia cobertura de longitudes de onda. En la conferencia se explicó que estaba confirmada la incorporación de un canal en la banda ultravioleta cercana, mientras que algunas ampliaciones hacia el infrarrojo más lejano seguían pendientes de financiación.

El diseño permitirá trabajar con la luz integrada de un objeto o, mediante una unidad de campo integral y un conjunto de fibras, obtener espectros conservando información espacial. Esta segunda posibilidad será especialmente valiosa para intentar separar la luz reflejada por un planeta de la luz mucho más intensa de su estrella.

Entre los distintos objetivos científicos de ANDES, el estudio de atmósferas de planetas similares a la Tierra se ha situado como una prioridad de diseño. No se trata simplemente de utilizar un instrumento general para observar exoplanetas: parte de sus capacidades se está optimizando específicamente para abordar este problema.

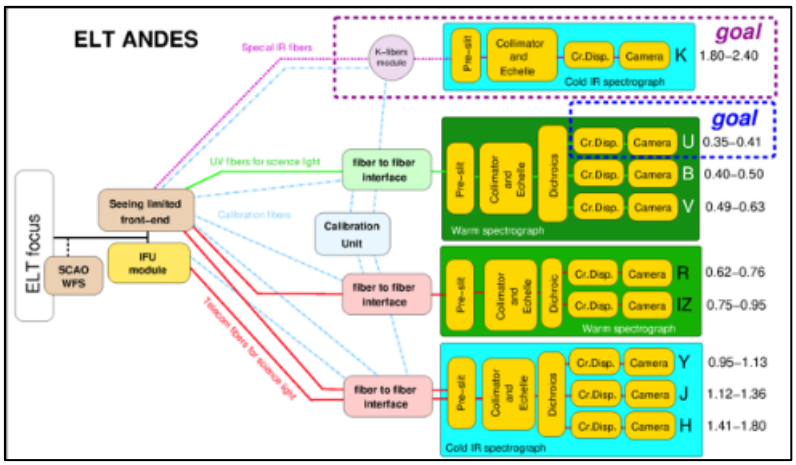

Figura 3. Esquema del instrumento ANDES

De los Júpiteres calientes a los subneptunos

Con los instrumentos actuales ya se estudian algunas propiedades dinámicas de atmósferas extremadamente calientes, incluso diferencias entre regiones del terminador matutino y vespertino o entre distintas capas atmosféricas. Pero estas medidas se concentran en planetas con temperaturas muy elevadas, a veces superiores a 2.000 K.

Las simulaciones presentadas muestran que ANDES ampliará enormemente esta capacidad. En planetas gigantes, las señales de agua y otros compuestos deberían alcanzar relaciones señal-ruido mucho mayores que las actuales. Esto permitirá comparar composiciones químicas, temperaturas y patrones de viento, avanzando hacia una verdadera meteorología de exoplanetas.

En los subneptunos, la alta resolución también permitirá reducir las ambigüedades de los espectros de baja resolución. Cada molécula presenta un patrón particular de numerosas líneas que puede compararse con plantillas espectrales. Mediante estas técnicas de correlación y cartografiado molecular podremos identificar compuestos minoritarios y mejorar los modelos sobre el origen y la estructura de estos planetas.

La diversidad de los mundos intermedios es especialmente interesante. Algunos podrían ser ricos en agua; otros tendrían un núcleo rocoso y una envoltura de hidrógeno y helio. Se ha propuesto incluso la posibilidad de mundos con océanos bajo atmósferas ricas en hidrógeno, aunque su habitabilidad real continúa siendo objeto de debate. El primer paso es averiguar qué composición tienen realmente.

¿Podremos detectar atmósferas en planetas del tamaño de la Tierra?

El reto principal de ANDES será descender hasta los planetas rocosos. Según las simulaciones mostradas, entre los objetos conocidos existe un conjunto de unas decenas de planetas cuyas atmósferas podrían ser accesibles mediante observaciones de uno o varios tránsitos. Se trata de previsiones basadas en modelos y en las prestaciones esperadas del futuro instrumento, no de detecciones ya realizadas.

El sistema TRAPPIST-1 ofrece un ejemplo particularmente atractivo. Varios de sus planetas se encuentran cerca de la región donde podría existir agua líquida, pero todavía no sabemos si poseen atmósferas ni qué características tendrían. Si alguno tuviera una atmósfera comparable a la terrestre, las simulaciones indican que unas pocas observaciones de tránsito podrían permitir detectar bandas de agua y dióxido de carbono. La identificación del oxígeno sería mucho más exigente y requeriría acumular numerosos tránsitos.

La conferencia planteó la posibilidad de dedicar un programa de observación prolongado, distribuido durante años, a explorar de manera sistemática las atmósferas de estos mundos. Incluso con el ELT, sin embargo, la técnica favorecerá sobre todo a planetas que transitan alrededor de estrellas enanas rojas. El contraste de tamaños entre estrella y planeta es mucho más favorable en estos sistemas que en los formados por una estrella semejante al Sol.

Las enanas rojas introducen otra dificultad: durante su juventud pueden presentar intensa actividad magnética, fulguraciones y radiación ultravioleta capaz de erosionar las atmósferas planetarias. Por eso, antes de preguntarnos si un planeta puede albergar vida, debemos comprobar si ha logrado conservar una atmósfera.

Señales ambiguas y la necesidad de confirmar los resultados

Las posibles detecciones atmosféricas en pequeños planetas alrededor de enanas rojas ilustran hasta qué punto son difíciles estas observaciones. En la conferencia se comentaron casos en los que ciertas medidas fotométricas o espectroscópicas se interpretaron

inicialmente como indicios de una atmósfera o de pérdida de gas, pero observaciones posteriores no reprodujeron la señal.

Este tipo de resultados exige prudencia. Una diferencia de brillo o una línea espectral aislada no siempre procede del planeta: puede deberse a variaciones de la estrella, al comportamiento instrumental o a la atmósfera terrestre. Para extraer conclusiones robustas necesitaremos observaciones repetidas, modelos físicos detallados y métodos de reducción de datos capaces de controlar efectos sistemáticos muy pequeños.

HD 209458 b: una advertencia sobre la contaminación estelar

Un ejemplo revelador es HD 209458 b, uno de los primeros exoplanetas en los que se observó un tránsito y se anunció la detección de una atmósfera. Se trata de un Júpiter caliente, especialmente favorable para este tipo de estudios. Las primeras medidas identificaron una señal en la región de las líneas del sodio, interpretada como absorción atmosférica.

Posteriormente, observaciones de alta resolución realizadas con instrumentos terrestres, entre ellos CARMENES y ESPRESSO, mostraron una estructura más compleja. En lugar de las dos absorciones esperadas, aparecían deformaciones de las líneas que también podían reconocerse en regiones del espectro donde no debía existir absorción planetaria. Los investigadores estudiaron entonces si el origen de la señal podía estar en la propia estrella.

Las estrellas no presentan un disco de brillo uniforme: sus regiones centrales y periféricas emiten con intensidades y perfiles espectrales diferentes. Este fenómeno, denominado variación de centro a borde, altera el espectro integrado cuando un planeta oculta sucesivamente distintas zonas del disco. A ello se suma el efecto Rossiter-McLaughlin: la rotación estelar hace que una mitad del disco se acerque y la otra se aleje de nosotros, y el tránsito modifica el equilibrio de velocidades observado.

Los modelos estelares tridimensionales presentados en la conferencia reproducían la estructura detectada, apoyando la interpretación de que la señal atribuida al sodio estaba dominada por efectos estelares. La lección no es que la espectroscopía de exoplanetas resulte inútil, sino que incluso en un planeta gigante y aparentemente fácil podemos confundir una señal de la estrella con otra del planeta. El problema será mucho más delicado cuando intentemos medir atmósferas terrestres.

El proyecto SPIR: preparar el análisis antes de recibir los datos

El aumento de tamaño del telescopio reducirá el ruido estadístico asociado al número de fotones, pero no eliminará automáticamente los errores sistemáticos. Las líneas de absorción de nuestra atmósfera —incluidas las más débiles—, la actividad estelar, los efectos geométricos del tránsito y la estabilidad instrumental pueden producir señales comparables a las que buscamos.

El proyecto SPIR, desarrollado en el Instituto de Astrofísica de Canarias, pretende anticiparse a estas dificultades. Su objetivo es construir modelos y procedimientos de reducción de datos capaces de describir y separar las distintas contribuciones al espectro observado. Para detectar una atmósfera semejante a la terrestre no bastará con mejorar modestamente las técnicas actuales: será necesario controlar determinados efectos con una precisión uno o dos órdenes de magnitud superior.

El trabajo combina observaciones, simulaciones y desarrollo de métodos de análisis. La idea es llegar al momento en que ANDES comience a producir datos con las herramientas necesarias para interpretarlos correctamente y evitar tanto falsas detecciones como señales reales que pasen inadvertidas.

La luz reflejada: observar planetas que no transitan

La espectroscopía de transmisión solo puede aplicarse a una pequeña fracción de los sistemas planetarios, aquellos cuya geometría permite observar tránsitos. La mayoría de los planetas no pasan por delante de su estrella desde nuestra perspectiva. Para ampliar la búsqueda necesitamos estudiar directamente la luz que reflejan.

La luz reflejada proporciona información diferente de la transmisión. Mientras esta última sondea principalmente las capas atmosféricas atravesadas tangencialmente por la luz estelar, la reflexión puede contener señales de nubes y, en condiciones favorables, de la superficie del planeta. En principio podrían buscarse características asociadas a minerales, océanos o pigmentos biológicos, aunque su detección requeriría una sensibilidad extraordinaria.

El obstáculo es el enorme contraste de brillo: un planeta parecido a la Tierra puede ser millones de veces menos luminoso que su estrella y encontrarse a una separación angular diminuta. La estrategia prevista para ANDES combina alta resolución espacial y espectral. Un coronógrafo atenúa gran parte de la luz estelar, mientras que el análisis espectroscópico de alta resolución intenta distinguir el patrón Doppler del planeta de los residuos de la estrella.

La combinación de ambas técnicas permitiría alcanzar contrastes que ninguna de ellas conseguiría por separado. Es un procedimiento técnicamente muy exigente, pero abre la posibilidad de caracterizar planetas que hoy quedan fuera del alcance de la espectroscopía de tránsito.

Los primeros candidatos para la observación en luz reflejada

Las estimaciones expuestas durante la conferencia identificaban inicialmente cinco posibles planetas rocosos y templados al alcance de esta técnica. Tras revisar las detecciones y las limitaciones del diseño, la selección se redujo a tres candidatos especialmente prometedores, entre ellos Próxima Centauri b y GJ 273 b.

En el caso de Próxima Centauri b, las simulaciones apuntaban a una detección potencial con una integración del orden de una noche, mientras que otros candidatos podrían requerir varias noches. Estas cifras dependen de supuestos sobre el albedo, el contraste, la separación angular y el rendimiento real del instrumento. Son estimaciones de viabilidad, no compromisos de observación ni resultados garantizados.

Además de esos candidatos similares a la Tierra, existirían numerosos planetas más grandes —supertierras, neptunos y gigantes gaseosos— cuya luz reflejada podría estudiarse. Muchos no transitan y, por tanto, no son accesibles con los métodos atmosféricos que dominan actualmente. Esta nueva vía ampliaría de manera decisiva la diversidad de mundos que podremos investigar.

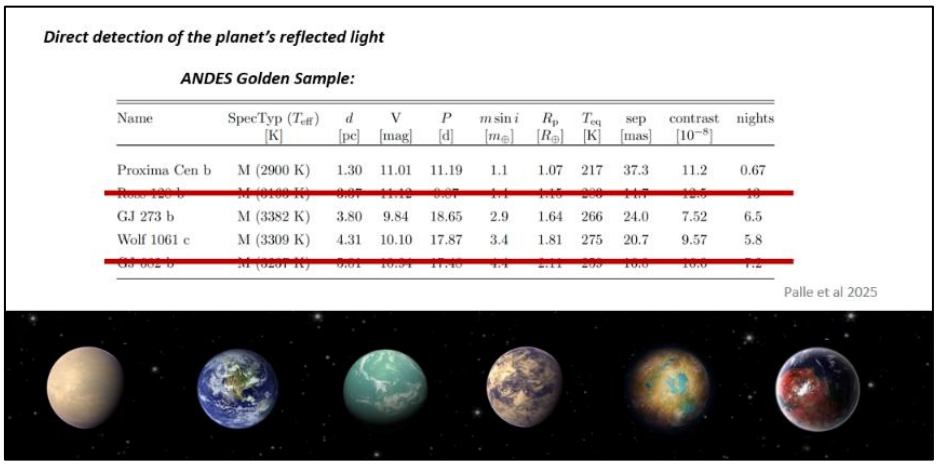

Figura 4.Primeros candidatos para ver la luz reflejada del planeta

Perspectivas de una nueva etapa

ANDES y el ELT representan un cambio de escala tanto en instrumentación como en análisis científico. La capacidad de recoger más luz y obtener espectros extremadamente detallados permitirá estudiar atmósferas de mundos cada vez más pequeños, medir su composición y explorar procesos dinámicos que hoy apenas podemos intuir.

El resultado más importante quizá sea poder responder una pregunta básica: ¿los planetas rocosos que orbitan en la zona potencialmente habitable de estrellas cercanas tienen atmósferas? Si las tienen, el siguiente paso será investigar qué gases contienen y qué condiciones físicas podrían existir en ellas. La búsqueda de indicios de vida será una consecuencia de ese conocimiento, pero no debe confundirse con una detección inmediata ni inequívoca.

El reto es doble. Necesitamos terminar y poner en funcionamiento una instalación extremadamente compleja, pero también aprender a extraer señales diminutas de datos contaminados por numerosos fenómenos físicos. La próxima década exigirá avances en ambos frentes y podría abrir una etapa completamente nueva en el estudio de los planetas extrasolares.

Preguntas

¿Existe algún biomarcador inequívoco?

No existe una molécula aislada que pueda considerarse una prueba definitiva de vida. El oxígeno, el metano o el agua, por separado, pueden tener explicaciones no biológicas. Una combinación abundante y simultánea de agua, metano y oxígeno u ozono sería mucho más convincente, porque resulta difícil mantener ese desequilibrio químico sin una fuente activa. Aun así, siempre habría que estudiar el contexto planetario y descartar procesos alternativos. Además, durante gran parte de la historia de la Tierra existió vida sin una atmósfera rica en oxígeno.

¿Cómo funciona el diseño óptico del ELT y qué papel tiene su espejo cuaternario?

El espejo primario recoge la luz y la envía a los espejos siguientes, que la conducen y adaptan hasta los instrumentos científicos. El sistema utiliza cinco espejos. El cuaternario es un elemento esencial de la óptica adaptativa: puede deformarse rápidamente para compensar las perturbaciones atmosféricas. El quinto espejo dirige finalmente la luz hacia los focos instrumentales.

¿Podríamos observar océanos, continentes o variaciones estacionales en la luz reflejada de un exoplaneta?

En principio, la observación repetida de la luz reflejada podría revelar cambios relacionados con la rotación, las nubes, las superficies y quizá las estaciones. El problema es la enorme cantidad de tiempo de telescopio necesaria. Un programa de este tipo sería difícil en los primeros años de funcionamiento del ELT, aunque podría plantearse más adelante para un objetivo especialmente prometedor. Algunas medidas fotométricas podrían resultar más favorables desde futuras misiones espaciales.

¿ANDES podrá estudiar las bandas de absorción del oxígeno molecular?

Sí. Algunas bandas importantes del oxígeno molecular están en el visible, alrededor de 0,7–0,8 micrómetros. El James Webb está optimizado principalmente para el infrarrojo y no es el instrumento más adecuado para estudiar esas bandas en pequeños exoplanetas. ANDES, en cambio, incluirá cobertura espectral en la región visible y podrá abordar ese objetivo.