

# LA QUÍMICA ORGÀNICA DE TITÀ

## UN LABORATORI A ESCALA PLANETÀRIA PER A ESTUDIAR LA TERRA PRIMITIVA

ATHENA COUSTENIS

Múltiples observacions espacials i terrestres, així com la recent missió de la sonda Cassini-Huygens, han revelat informació de Tità, el major satèl·lit de Saturn. L'atmosfera de Tità amaga una de les químiques orgàniques més complexes del sistema solar, començant amb el nitrogen i el metà que permet la formació d'hidrocarburs i nitrils i fins i tot de molècules prebiòtiques. La seua atmosfera també conté rastres de compostos d'oxigen. Aquest sistema està subjecte a variacions estacionals i a diferents processos físics, dinàmics i fotoquímics. Les interaccions entre l'atmosfera, la superfície i l'interior també compleixen un paper important en el potencial astrobiològic del satèl·lit.

Paraules clau: Tità, satèl·lits naturals, atmosfera, química orgànica.

### ■ L'ATMOSFERA DE TITÀ: UN COMPONENT ENIGMÀTIC I EXCEPCIONAL

Se sap des de fa més d'un segle que Tità, el major satèl·lit de Saturn, posseeix una atmosfera notable, la més semblant a la del nostre propi planeta que podem trobar al nostre sistema solar, ja que es compon bàsicament de nitrogen molecular ( $N_2$ ), amb rastres de metà i hidrogen que configuren una de les químiques orgàniques més complexes d'entre tots els objectes del nostre sistema solar. De fet, ja en 1944, Gerard Kuiper i alguns científics més van descobrir metà i altres hidrocarburs en l'atmosfera de Tità: età ( $C_2H_6$ ), metà monodeuterat ( $CH_3D$ ), etilè ( $C_2H_4$ ) i acetilè ( $C_2H_2$ ).

Les missions Voyager en els anys 1980 van aplegar molta informació sobre les característiques de Tità i la seua atmosfera, en termes de temperatura i estructura, però també van descobrir la densa cobertura de núvols sota la qual s'ocultava al rang òptic la superfície del satèl·lit.

L'arribada de la missió Cassini-Huygens en 2004 i la seua extensa exploració del sistema saturnià i de Tità en particular van proporcionar a la comunitat científica una imatge més nova i detallada de la química atmosfèrica, que està estretament lligada a les complexes variacions estacionals, així com als efectes dinàmics i al clima del satèl·lit en els últims deu anys.

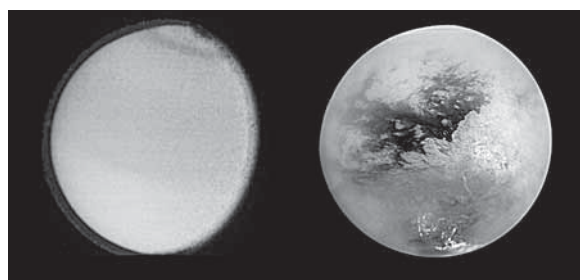


Figura 1. Tità, observat el 1980 amb les càmeres de la sonda Voyager 1 en l'espectre visible i el 2004 amb la càmera ISS de la sonda Cassini a  $0,94 \mu\text{m}$ .

#### Paràmetres orbitals i físics i propietats atmosfèriques de Tità

Radi de superfície	2575 km
Massa	$1,35 \times 10^{23}$ kg (= $0,022 \times$ Terra)
Densitat mitjana	$1880 \text{ kg m}^{-3}$
Distància de Saturn	$1,23 \times 10^9$ m (=20 radis de Saturn)
Distància del Sol	9,546 AU
Període orbital	15,95 dies
Translació	29,5 anys
Obliqüitat	$26,7^\circ$
Temperatura de la superfície	93,6 K
Pressió en la superfície	1,467 bar

Taula 1. Característiques de Tità, el major satèl·lite de Saturn.

FONT Coustenis, A., (2014). «Titan». En *The Encyclopedia of the Solar System*, tercera edició.

«LES MISSIONS VOYAGER EN ELS ANYS 1980 VAN APLEGAR MOLTA INFORMACIÓ SOBRE LES CARACTERÍSTIQUES DE TITÀ I LA SEUA ATMOSFERA»

## ■ ESTRUCTURA TÈRMICA DE TITÀ

A més de les dades de radioocultació de la Voyager 1, els mesuraments de l'espectròmetre compost infraroig (CIRS) de l'orbitador i de l'instrument d'estructura atmosfèrica de la Huygens (HASI) en el lloc d'aterratge de la sonda (10°S, 192°W), des de 1400 km d'altitud fins a la superfície, ens han permès reconstruir l'estructura tèrmica de Tità. Es va mesurar una temperatura superficial de  $93,65 \pm 0,25$  K per a una pressió de  $1467 \pm 1$  mbar (Fulchignoni et al., 2005). Com ja havia mostrat anteriorment la Voyager, les dades indicaven que l'atmosfera de Tità es componia (de major a menor altitud) d'una termosfera, una mesosfera, una estratosfera i una troposfera, amb dues grans inversions tèrmiques als 40 i als 250 km que corresponen a la tropopausa i l'estratopausa, associades amb temperatures de 70,43 K (mínim) i 186 K (màxim). També s'hi va trobar una mesopausa a 490 km (amb 152 K) en els primers anys de la missió Cassini, però aquesta ha desaparegut gradualment en els últims anys, la qual cosa dona un perfil més homogeni.

### «EL NORANTA PER CENT DE L'ENERGIA DE LA SUPERFÍCIE DE TITÀ ES MANTÉ GRÀCIES A UN EFECTE D'HIVERNACLE CAUSAT PEL NITROGEN, EL METÀ I L'HIDROGEN»

No es van detectar canvis significatius de temperatura en el lapse interanual, però sí que es van trobar canvis extrems entre estacions, especialment en els pols, amb un pol sud que en l'actualitat és extremadament fred; un estat que ha assolit en tan sols un parell d'anys (Coustenis et al., 2013; 2015).

El noranta per cent de l'energia de la superfície de Tità es manté gràcies a un efecte d'hivernacle causat pel nitrogen, el metà i l'hidrogen, molècules simètriques que normalment no causen un efecte d'hivernacle a la Terra però sí a Tità, a causa de la densa atmosfera. Aquesta opacitat bloca l'emissió tèrmica reflectida per la superfície, la qual cosa crea un escalfament en la part baixa de l'atmosfera, com ocorre a la Terra, on l'aigua és el principal agent. Encara més interessant és que Tità és l'únic món del sistema solar amb un efecte antihivernacle que permet passar la llum però bloca els infrarojos, a causa de les capes de boira de l'atmosfera. L'efecte antihivernacle a Tità té la meitat de potència que el seu efecte d'hivernacle. La temperatura de

Constituent	Fracció molar (nivell d'altitud atmosfèrica)
<b>PRINCIPALS</b>	
Nitrogen molecular, N <sub>2</sub>	0,98
Metà, CH <sub>4</sub>	4,9 × 10 <sup>-2</sup> (superfície) 1,4–1,6 × 10 <sup>-2</sup> (estratosfera)
Metà monodeuterat, CH <sub>3</sub> D	6 × 10 <sup>-6</sup> (estratosfera)
Argó, <sup>36</sup> Ar	2,8 × 10 <sup>-7</sup>
<sup>40</sup> Ar	4,3 × 10 <sup>-5</sup>
<b>MENORS</b>	
Hidrogen, H <sub>2</sub>	-0,0011
Età, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1,5 × 10 <sup>-5</sup> (aproximadament 130 km)
Propà, C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	5 × 10 <sup>-7</sup> (aproximadament 125 km)
Acetilè, C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	4 × 10 <sup>-6</sup> (aproximadament 140 km)
Etilè, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,5 × 10 <sup>-7</sup> (aproximadament 130 km)
Metilacetilè, CH <sub>3</sub> C <sub>2</sub> H	6,5 × 10 <sup>-9</sup> (aproximadament 110 km) <sup>a</sup>
Diacetilè, C <sub>4</sub> H <sub>2</sub>	1,3 × 10 <sup>-9</sup> (aproximadament 110 km) <sup>a</sup>
Cianogen, C <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	5,5 × 10 <sup>-9</sup> (aproximadament 120 km) <sup>a</sup>
Cianur d'hidrogen, HCN	1,0 × 10 <sup>-7</sup> (aproximadament 120 km) <sup>a</sup> 5 × 10 <sup>-7</sup> (aproximadament 200 km) <sup>b</sup> 5 × 10 <sup>-6</sup> (aproximadament 500 km) <sup>b</sup>
Cianoacetilè, HC <sub>3</sub> N	1 × 10 <sup>-9</sup> (aproximadament 120 km) <sup>a</sup> 1 × 10 <sup>-8</sup> (aproximadament 500 km) <sup>b</sup>
Acetonitril, CH <sub>3</sub> CN	1 × 10 <sup>-8</sup> (aproximadament 200 km) <sup>c</sup> 1 × 10 <sup>-7</sup> (aproximadament 500 km)
Aigua, H <sub>2</sub> O	8 × 10 <sup>-9</sup> (a 400 km) <sup>d</sup> i 10 <sup>-10</sup> (a 200 km) <sup>e</sup>
Monòxid de carboni, CO	4 × 10 <sup>-5</sup> (perfil uniforme) <sup>f</sup>
Diòxid de carboni, CO <sub>2</sub>	1,5 × 10 <sup>-8</sup> (aproximadament 120 km)

<sup>a</sup> Augmenta en el nord.

<sup>b</sup> Dades d'observacions terrestres mitjançant un instrument de microones heterodí.

<sup>c</sup> Observat només des de la superfície.

<sup>d</sup> Dades d'observacions ISO.

<sup>e</sup> Dades de Cassini/CIRS.

<sup>f</sup> Dades de Cassini i d'observacions terrestres.

Taula 2. Composició química de l'atmosfera de Tità d'acord amb Cassini-Huygens.

FONT: Coustenis, A., (2014). «Titan». En *The Encyclopedia of the Solar System*, tercera edició, i les seues referències. Les xifres són resultats de Cassini-Huygens llevat que s'indique el contrari.

l'emissió troposfèrica (prop de la tropopausa) està determinada per l'efecte antihivernacle i és 9 K més freda que la temperatura efectiva (McKay, 2005). L'augment en la temperatura des de la tropopausa fins a la superfície és degut a un efecte d'hivernacle de 21 K, conseqüència de la radiació tèrmica IR (113 %) emesa des de la baixa atmosfera i que escalfa la superfície.

## ■ COMPOSICIÓ QUÍMICA DE TITÀ

L'atmosfera de Tità és com una fàbrica de productes químics en què la formació d'ions positius i negatius complexos en l'alta termosfera és una conseqüència de les interaccions entre magnetosfera, ionosfera i atmosfera, que impliquen radiació solar ultraviolada extrema

(EUV), radiació ultraviolada, ions energètics i electrons (Waite et al., 2007).

En l'atmosfera neutral, la química del metà ( $\text{CH}_4$ ) s'emparella amb el nitrogen molecular ( $\text{N}_2$ ) per a produir molts compostos orgànics en fase de gas i de condensació: hidrocarburs, nitrils i compostos orgànics refractaris complexos que produeixen tolins, objecte d'hipòtesis i de simulacions en laboratori (Waite et al., 2007; Coll et al., 1999). El nitrogen molecular (detectat en el UV) és, de llarg, el component majoritari de l'atmosfera (més del 95 % de mitjana). La presència de metà (la segona molècula més abundant, amb una ràtio de mescla de prop de l'1,5 % en l'estratosfera i 5 % en la superfície) i de rastres d'hidrogen dóna lloc a una multitud de gasos orgànics i boires la presència dels quals en l'estratosfera es va establir ja en el segle XX.

### ■ LA QUÍMICA IONOSFÈRICA

Es va descobrir que Tità tenia una ionosfera bastant extensa, principalment a causa de la falta d'un camp magnètic global propi. Els fotons d'alta energia (EUV i raigs X) i les partícules energètiques de la magnetosfera de Saturn són les principals fonts d'energia en l'atmosfera superior de Tità, que creen una ionosfera extensa entre 700 i 2700 km. A altituds baixes, la radiació còsmica galàctica (GCR) és la responsable d'una altra capa d'ions en l'atmosfera (entre 40 i 140 km), mentre que la fotoquímica atmosfèrica neutral es veu impulsada principalment pels fotons solars FUV.

L'anàlisi directa de la ionosfera efectuada per l'instrument INMS durant els vols a baixa altitud de la sonda Cassini sobre Tità mostra la presència de moltes espècies orgàniques a nivells detectables, a pesar de l'alta altitud (Waite et al., 2007; figura 2).

Aquestes observacions obren nous camins per a la nostra percepció dels processos orgànics de l'atmosfera de Tità, amb una estreta implicació de la química ionosfèrica en la formació de compostos orgànics d'alt nivell en l'entorn de Tità que no s'imaginava anteriorment. Segons cauen i augmenten les partícules en suspensió en l'atmosfera, es tornen detectables amb sistemes d'imatge com el subsistema d'imatge de Cassini (ISS) des d'uns ~500 km d'altitud, i es detecta que són presents per tota l'estratosfera (Porco et al., 2005). Absorbeixen molta radiació ultraviolada i radiació visible i compleixen un paper fonamental perquè escalfen l'estratosfera de Tità i condueixen la circulació dels sistemes edílics en

**«L'ANÀLISI DIRECTA DE LA IONOSFERA EFECTUADA PER L'INSTRUMENT INMS DURANT ELS VOLS A BAIXA ALTITUD DE LA SONDA CASSINI SOBRE TITÀ MOSTRA LA PRESÈNCIA DE MOLTES ESPÈCIES ORGÀNIQUES»**

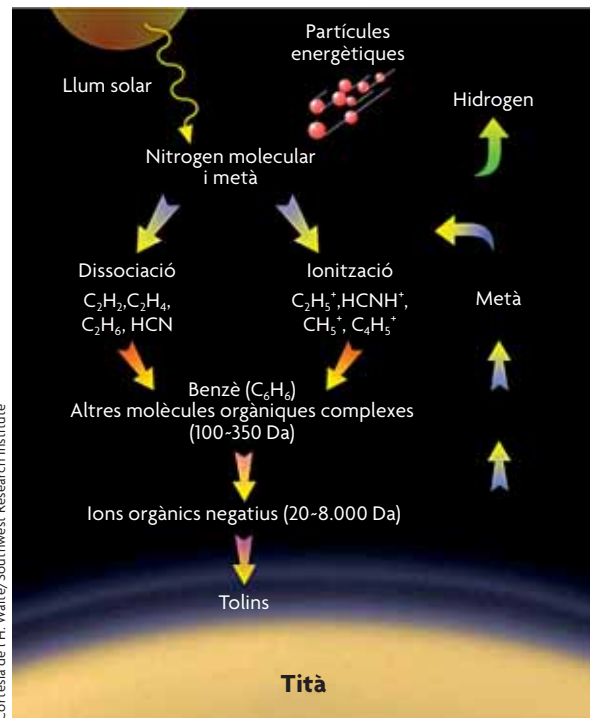


Figura 2. Esquema de la complexa química orgànica de Tità.

l'atmosfera mitjana, de manera semblant a com ho fa l'ozó en l'atmosfera mitjana de la Terra.

### ■ LA QUÍMICA NEUTRAL

Recentment, Cassini ha proporcionat distribucions espacials precises (longitudinals i verticals) dels gasos traça (figura 3). Les distribucions verticals generalment augmenten amb l'altitud, la qual cosa confirma la predicció dels models fotoquímics segons la qual aquestes espècies es formen en l'alta atmosfera i més avant es dispersen cap avall en l'estratosfera. Per sota del nivell de condensació de cada gas, es pensa que les distribucions disminueixen seguint la corresponent llei de saturació del vapor. Entre els tipus de gasos detectats fins avui trobem hidrocarburs i nitrils, però Cassini/CIRS i l'INMS també van detectar traces de vapor d'aigua en l'atmosfera de Tità (Coustenis et al., 1998), així com benzè (Flasar et al., 2005).

Les observacions heterodines mil·limètriques terrestres d'alta resolució van oferir l'oportunitat de determinar, en alguns casos, els perfils verticals i el mapatge parcial de HCN, CO,  $\text{HC}_3\text{N}$  i  $\text{CH}_3\text{CN}$ , que mostrava que l'abun-

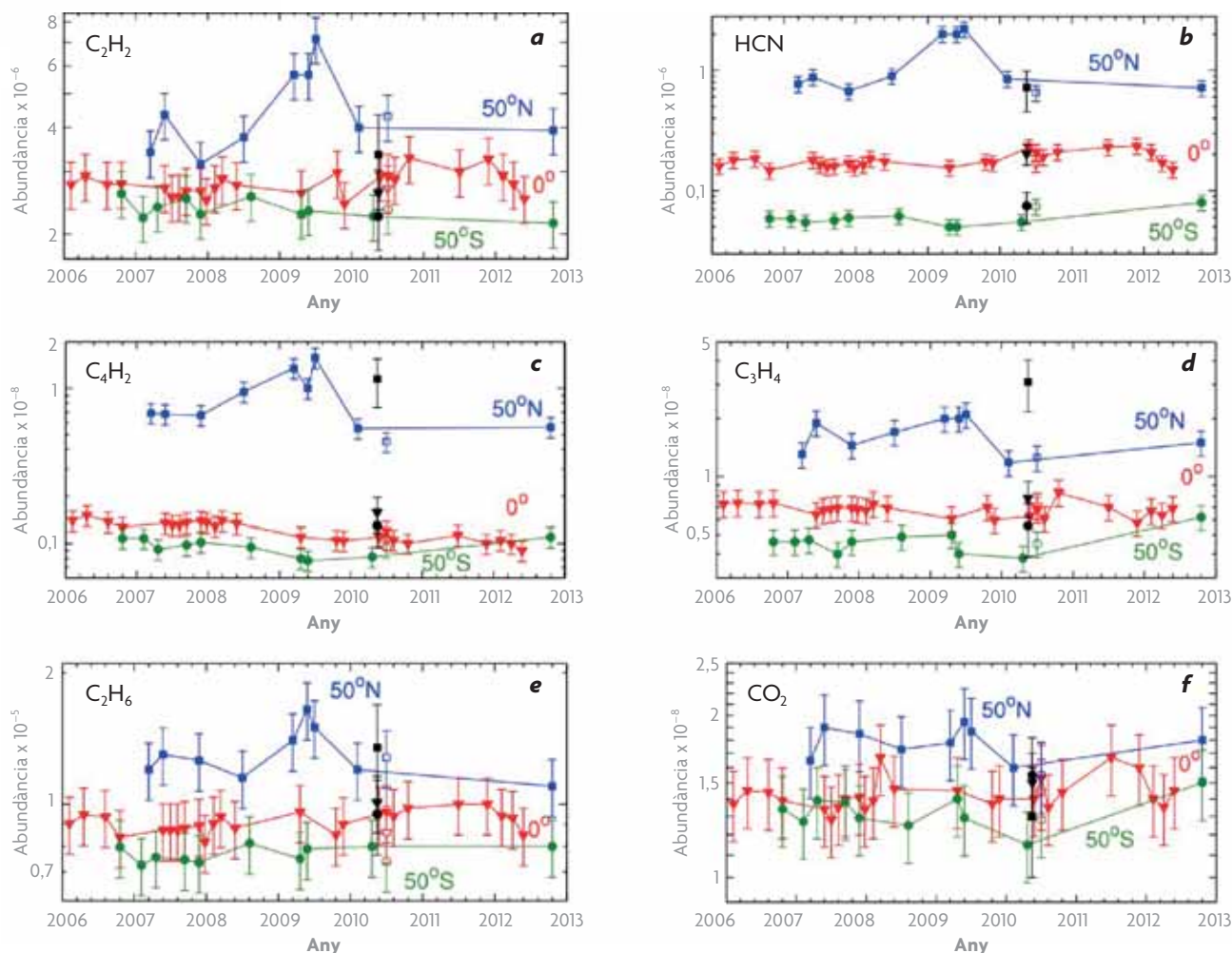


Figura 3. Variacions en l'abundància de gasos en l'estratosfera de Tità durant la missió Cassini a 50°S (cercles i línies verdes), en l'equador (triangles i línies roges) i a 50°N (quadrats i línies blaves), inferits de dades d'alta resolució en el nadir per a: **a)** C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, **b)** HCN, **c)** C<sub>4</sub>H<sub>2</sub>, **d)** C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>, **e)** C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> i **f)** CO<sub>2</sub>. Els símbols oberts corresponen a les inferències de la ràtio de mescla a partir de dades de resolució mitjana (2,5 cm<sup>-1</sup>) que teniem el 2010. Els símbols negres i les línies verticals corresponen a les abundàncies i barres d'error recalculades de la Voyager 1/IRIS.

FONT: Coustenis et al., 2013.

dància de nitril s'incrementava amb l'altitud. Les quantitats d'aquestes espècies disminueixen en la baixa atmosfera.

Més prop de la superfície, la sonda Cassini-Huygens per fi va permetre determinar els principals components amb seguretat: igual com els mesuraments de CIRS en l'estratosfera, l'instrument de cromatografia de gas i espectrometria de masses de Huygens (GCMS) va descobrir una fracció molar de metà de  $(1,48 \pm 0,1) \times 10^{-2}$  en l'estratosfera, que s'incrementava per sota de la tropopausa i assolía  $5,65 \times 10^{-2}$  prop de la superfície, com indicaven els valors estratosfèrics de CIRS i l'estimat de la superfície de la càmera de descens i radiòmetre espectral (DISR) de Huygens, també pròxim al 5% (Tomasko et al., 2005). El GCMS també va registrar un increment ràpid del metà després d'ater-

rar, la qual cosa suggereix que hi ha metà líquid en la superfície, junt amb altres espècies orgàniques com el cianogen, el benzè, l'età i el diòxid de carboni (Niemann et al., 2010).

### ■ VARIACIONS ESPACIALS I TEMPORALS DE LA QUÍMICA I LA CIRCULACIÓ

Es van establir les variacions meridionals dels gasos en l'estratosfera de Tità, i es va veure que estaven estretament relacionats amb la circulació. L'abundància de molècules descoberta per Cassini en aquesta era (un any de Tità després de la trobada V1) indica un augment de la majoria de les espècies de l'estratosfera en latituds altes, amb valors semblants als observats fa trenta anys, amb algunes excepcions (figura 4).

Aquests contrastos longitudinals observats en les espècies químiques traça es podrien explicar per causes fotoquímiques i dinàmiques. La radiació ultraviolada del Sol actua en el metà i el nitrogen i crea radicals que es combinen per formar nitrils i hidrocarburs d'ordre superior. Aquesta producció ocorre en la mesosfera a altituds considerables (per damunt dels 300 km o 0,1 mbar). Els remolins mesclen i transporten aquestes molècules fins a la baixa estratosfera i la troposfera, on es condensen la majoria. La fotodissociació per radiació ultraviolada ocorre en terminis que van des d'uns quants dies fins a milers d'anys.

Sabem que hi ha un cicle estacional fort, causat per l'obliquïtat de Tità del 26,7%: durant la major part de l'any de Tità, el moviment meridional està dominat per una gran cèl·lula de Hadley que s'estén des del pol d'hivern fins al pol d'estiu, amb la configuració de dues cèl·lules simètriques típica dels equinoccis que ocorren únicament en un període de transició limitat. En els models, el doll es troba a prop de 60° en l'hemisferi nord, mentre que la circulació zonal a l'estiu està prop de la rotació del cos sòlid.

«A PESAR DE LA BAIXA TEMPERATURA, I AL CONTRARI DEL QUE ES DEIA SOVINT, TITÀ NO ÉS UNA TERRA SOLIDIFICADA: EL SISTEMA QUÍMIC NO ESTÀ CONGELAT»

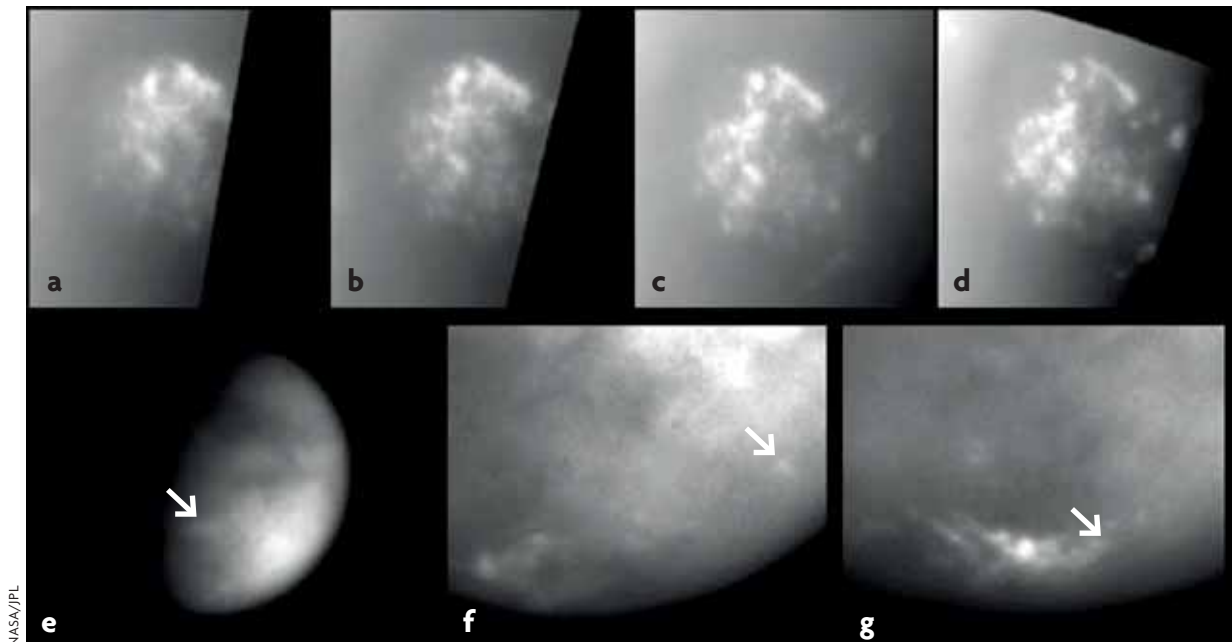
## ■ BOIRA I NÚVOLS A TITÀ

Molt prompte es va veure que un altre aspecte important de l'atmosfera de Tità era la presència d'aerosols. Començant per l'alta atmosfera, la rica composició química observada en la termosfera, juntament amb la detecció d'ions de gran massa, apuntava a la formació dels aerosols en la ionosfera, basant-se en les observacions de l'espectròmetre d'imatge ultraviolada (UVIS) que va detectar aerosols fins a ~900 km d'altitud i en la detecció d'ions negatius de gran massa en la ionosfera detectada per l'espectròmetre de plasma de Cassini (CAPS).

En la mesosfera, la càmera ISS de Cassini mostrava una fina i tènue capa de boira al voltant de la boira estratosfèrica, més densa.

Les imatges de Cassini també mostren una estructura multicapa en la regió del casquet polar nord i, en alguns casos, en latituds més baixes. Aquestes característiques podrien ser degudes a les onades de gravetat que s'han detectat a Tità en latituds baixes.

La naturalesa de les boires d'aerosols mesurades per la DISR de Huygens en el seu descens a través de l'atmosfera baixa de Tità indica que la grandària de



NASA/JPL

Figura 4. La meteorologia de Tità, observada amb la càmera ISS de Cassini. De **a)** a **d)**, seqüència de quatre imatges contínues de metà que mostren l'evolució temporal de la zona amb núvols del pol sud el 2 de juliol de 2004. De **e)** a **g)**, tres exemples de núvols discrets en latituds mitjanes (fletxes).

Font: De Porco et al., 2005, *Nature* 434, 159–168.

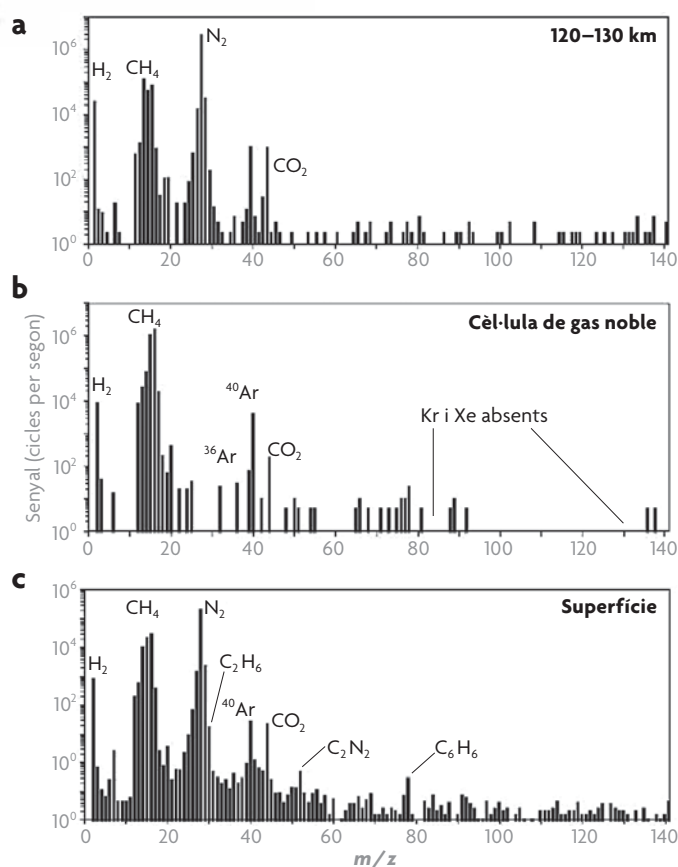


Figura 5. Composició de l'atmosfera i superfície de Tità a partir dels espectres de massa a diferents altituds realitzats pel GCMS de la sonda Huygens. Aquests espectres mitjans mostren la taxa de recompte d'ions per segon com una funció de càrrega unitària ( $m/z$ ), ja siga a 120-130 km (a) o a 75-77 en la cèl·lula de gas noble (b) o en la superfície (c).

FONT: Niemann et al., 2005.

les partícules agregades és unes quantes vegades major que el que s'espera (Tomasko et al., 2005). Les dades de la DISR són compatibles amb una capa fina de boira a una altitud de 21 km, que podria haver-se format per condensació de metà.

La Cassini-Huygens ha proporcionat nova informació sobre el paper del metà i el seu cicle en l'atmosfera de Tità. La humitat relativa del metà (prop del 50 %) descobert en la superfície per la DISR i l'evaporació presenciada pel GCMS mostren que han existit fluxos de fluid en la superfície i, probablement, tornaran a existir, per la qual cosa s'han de donar precipitacions de metà en l'atmosfera.

La fracció molar de 1,4–1,6 % del metà, mesurada pel CIRS i el GCMS en l'estratosfera, és consistent

amb els mesuraments espectrals de la DISR. A altituds molt baixes (20 m), la DISR i el GCMS van mesurar  $5 \pm 1 \%$  per a la fracció molar del metà.

Sorprendentment, el GCMS de Huygens no ha detectat una gran varietat de compostos orgànics en la baixa atmosfera. Els espectres de massa recopilats durant el descens mostren que l'estratosfera mitjana i baixa i la troposfera són pobres en espècies orgàniques volàtils, amb l'excepció del metà (Niemann et al., 2005). El GCMS va detectar no sols metà en la superfície, sinó també una multitud de materials condensats diferents, entre els quals destaquen  $C_2H_6$ ,  $CO_2$ ,  $C_2N_2$  i  $C_6H_6$  (figura 5).

S'han analitzat els aerosols, sobre la composició química dels quals no existien dades directes prèvies, amb l'instrument col·lector i pirolitzador d'aerosols (ACP). Els resultats de l'ACP mostren que les partícules d'aerosol són fetes de compostos orgànics refractaris que alliberen HCN i  $NH_3$  durant la piròlisi (Israel et al., 2005), que abonen la hipòtesi dels tolins.

## ■ IMPLICACIONS ASTROBIOLÒGIQUES

Tots els ingredients que se suposen necessaris perquè la vida aparega i prolifere –aigua líquida, matèria orgànica i energia– semblen estar presents en Tità (Cousens i Encrenaz, 2013).

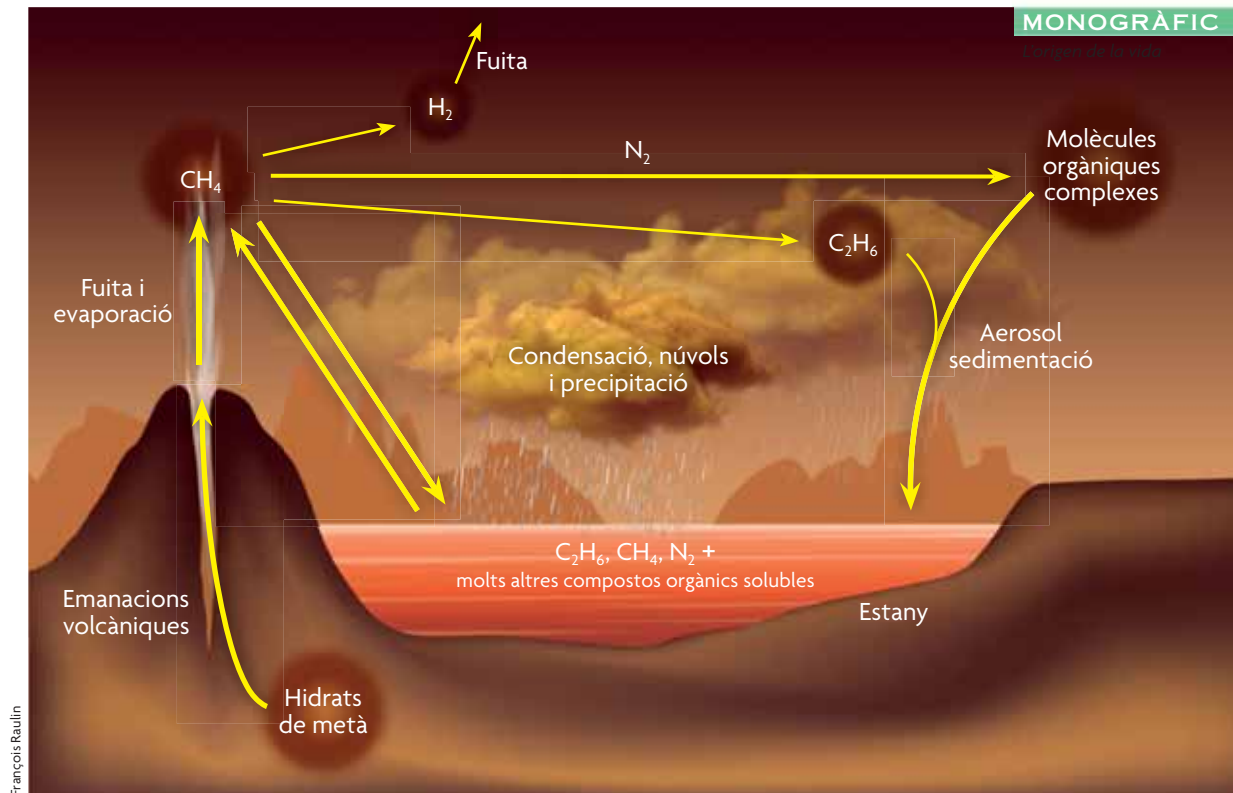
D'acord amb la informació que tenim avui dia sobre la química orgànica de Tità, l'evolució química dels principals constituents de l'atmosfera –dinitrogen i metà– produeix principalment età, que s'acumula en la superfície o en les primeres capes subterrànies i que

acaba dissolt en estanys i mars de metà i età (Raulin, 2008; figura 6), i elements orgànics refractaris que s'acumulen en la superfície, junt amb compostos orgànics volàtils condensats com el HCN o el benzè. A pesar de la baixa temperatura, i al contrari del que es deia sovint, Tità no és una Terra solidificada: el sistema químic no està congelat. Tità, igual com la seua química, és un cos planetari en evolució. Una vegada que els ae-

rosols i el seu contingut orgànic complex se sedimenten en la superfície de Tità poden seguir una evolució química molt interessant des del punt de vista astrobiològic.

Els mesuraments de gravetat i de rotació que va realitzar la Cassini indiquen la presència d'un oceà subterrani d'aigua líquida a Tità. Els models d'evolució tèrmica suggereixen que Tità podria tenir una escorça de gel d'entre 50 i 150 km de grossària sobre un oceà d'ai-

**«TITÀ ÉS L'ÚNIC COS DEL NOSTRE SISTEMA SOLAR A MÉS DE LA TERRA QUE PRESENTA UNA QUÍMICA ORGÀNICA COMPLEXA I ESTÀ EXPOSAT A COSSOS LÍQUIDS EN LA SUPERFÍCIE»**



François Raulin

Figura 6. Els estanys orgànics de Tità i la seua interacció amb l'interior i l'atmosfera. Aquí es representen el cicle del metà a Tità i els processos resultants.

gua líquida d'uns dos-cents quilòmetres de profunditat, amb una quantitat considerable (fins a un 30 %, encara que el més probable és que es trobe prop del ~10 %) d'amoníac dissolt que actua com a anticongelant (Iess et al., 2012). Davall hi ha una capa de gel a alta pressió.

Tità és l'únic cos del nostre sistema solar a més de la Terra que presenta una química orgànica tan complexa i està exposat a cossos líquids en la superfície. Junt amb la possibilitat addicional d'un oceà subterrani d'aigua líquida, Tità sembla el candidat ideal a món habitable al nostre sistema solar. ☺

#### REFERÈNCIES

- Coll, P., Guillemin, J. C., Gazeau, M. C., & Raulin, F. (1999). Report and implications of the first observation of  $C_2N_2$  in laboratory simulations of Titan's atmosphere. *Planetary and Space Science*, 47, 1433–1440. doi: 10.1016/S0032-0633(99)00069-0
- Coustonis, A., & Encrenaz, Th. (2013). *Life beyond Earth: the search for habitable worlds in the Universe*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Coustonis, A., Salama, A., Lellouch, E., Encrenaz, Th., Bjoraker, G. L., Samuelson, R. E., ... Kessler, M. F. (1998). Evidence for water vapor in Titan's atmosphere from ISO/SWS data. *Astronomy and Astrophysics*, 336(3), L85–L89.
- Coustonis, A., Bampasidis, G., Achterberg, R. K., Lavvas, P., Jennings, D. E., Nixon, C. A., ... Stamogiorgos, S. (2013). Evolution of the stratospheric temperature and chemical composition over one Titanian year. *The Astrophysical Journal*, 779, 177–185. doi: 10.1088/0004-637X/779/2/177
- Coustonis, A., Jennings, D. E., Achterberg, R. K., Bampasidis, G., Lavvas, P., Nixon, C. A., ... Flasar, F. M. (2015). Titan's temporal evolution in stratospheric trace gases near the poles. *Icarus*. doi: 10.1016/j.icarus.2015.08.027
- Flasar, F. M., Achterberg, R. K., Conrath, B. J., Gierasch, P. J., Kunde, V. G., Nixon, C. A., ... Wishnow, E. H. (2005). Titan's atmospheric temperatures, winds, and composition. *Science*, 308(5724), 975–978. doi: 10.1126/science.1111150
- Fulchignoni, M., Ferri, F., Angrilli, F., Ball, A. J., Bar-Nun, A., Barucci, M. A., ... ZRNaecki, J. C. (2005). *In situ* measurements of the physical characteristics of Titan's environment. *Nature*, 438, 785–791. doi: 10.1038/nature04314

- Iess, L., Jacobson, R. A., Ducci, M., Stevenson, D. J., Lunine, J. I., Armstrong, J. W., ... Tortora, P. (2012). The tides of Titan. *Science*, 337(6093), 457–459. doi: 10.1126/science.1219631
- Israël, G., Szopa, C., Raulin, F., Cabane, M., Niemann, H. B., Atreya, S. K., ... Vidal-Madjar, C. (2005). Complex organic matter in Titan's atmospheric aerosols from *in situ* pyrolysis and analysis. *Nature*, 438, 796–799. doi: 10.1038/nature04349
- McKay, C. (2005, 3 de novembre). Titan: Greenhouse and Anti-greenhouse. *Astrobiology Magazine*. Consultat en <http://www.astrobio.net/topic/solar-system/saturn/titan/titan-greenhouse-and-anti-greenhouse/>
- Niemann, H. B., Atreya, S. K., Bauer, S. J., Carignan, G. R., Demick, J. E., Frost, R. L., ... Way, S. H. (2005). The abundances of constituents of Titan's atmosphere from the GCMS instrument on the Huygens probe. *Nature*, 438, 779–784. doi: 10.1038/nature04122
- Niemann, H. B., Atreya, S. K., Demick, J. E., Gautier, D., Haberman, J. A., Harpold, D. N., ... Raulin, F. (2010). Composition of Titan's lower atmosphere and simple surface volatiles as measured by the Cassini-Huygens probe gas chromatograph mass spectrometer experiment. *Journal of Geophysical Research*, 115(12), 2156–2202. doi: 10.1029/2010JE003659
- Porco, C. C., Baker, E., Barbara, J., Beurle, K., Brahic, A., Burns, J. A., ... West, R. (2005). Imaging of Titan from the Cassini spacecraft. *Nature*, 434, 159–168. doi: 10.1038/nature03436
- Raulin, F. (2008). Planetary science: Organic lakes on Titan. *Nature*, 454, 587–589. doi: 10.1038/454587a
- Tomasko, M. G., Archinal, B., Becker, T., Bézard, B., Bushroo, M., Combes, M., ... West, R. (2005). Rain, winds and haze during the Huygens probe's descent to Titan's surface. *Nature*, 438, 765–778. doi: 10.1038/nature04126
- Waite, J. H., Young, D. T., Cravens, T. E., Croates, A. J., Crary, F. J., Magee, B., & Westlake, J. (2007). The Process of Tholin Formation in Titan's Upper Atmosphere. *Science*, 316(5826), 870–875. doi: 10.1126/science.1139727

**Athena Coustenis.** Directora d'Investigació del CNRS en l'Observatori de París. S'especialitza en planetologia i missions espacials al sistema solar exterior. És presidenta del Comitè de Ciències Espacials de la Fundació Científica Europea i membre del comitè executiu de l'Institut Internacional de Ciència Espacial. Forma part del consell editorial d'*Astronomy & Astrophysics Review*, *Astronomy and Astrophysics Library* i *Philosophical Transactions A*.