

00582

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LOS PROCESOS
INICIADOS POR PLASMAS FRIOS EN UNA
ATMOSFERA SIMULADA DE TITAN**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTORA EN CIENCIAS QUIMICAS
(Q . A N A L I T I C A)
P R E S E N T A :
M. EN C. SANDRA IGNACIA RAMIREZ JIMENEZ

281975

MEXICO, D.F.

SEPTIEMBRE DEL 2000



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

El presente trabajo de tesis se desarrolló en el Laboratorio de Química de Plasmas y Estudios Planetarios del Instituto de Ciencias Nucleares de la Universidad Nacional Autónoma de México bajo la dirección del Dr. Rafael Navarro González y en el Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques de la Universidad de París 12, Francia bajo la dirección del Profr. François Raulin y del Dr. Patrice Coll. con el apoyo del programa ECOS/CONACYT-SEP-ANNUIES M97U01 y de los proyectos de investigación CONACyT-1843-OE9211, -F32E-9211, -4282-E9406, -400349-5-1843E, UNAM-BIT 95-B3-A-DGP-0000-0184 y DGAPA-IN100393, -IN102796

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento muy especial para el Dr. Rafael Navarro González por haber dirigido el presente trabajo de tesis con dedicación, responsabilidad académica y orientando siempre de manera positiva mi formación profesional.

Agradezco también al Profr. François Raulin por haberme permitido pertenecer a su grupo de trabajo, por su confianza y por sus enriquecedores y siempre atinados comentarios.

Al Dr. Patrice Coll por la manera tan jovial y llena de profesionalismo con que asesoró el presente trabajo de investigación. Por que es un ser humano muy cálido y un investigador que todo lo comparte.

Al Dr. Vladimir Basiuk por su siempre alentador apoyo.

A mis compañeros del Laboratorio de Química de Plasmas y Estudios Planetarios: Lilia, Itzel, Antígona, Delphine, Fanny, Leonel y Pepe por compartir conmigo sus conocimientos y su amistad.

Au membres du Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques: Isabelle, Marie-Claire, Veronique, Corine, Claude, Sandrine, David, Cyril, Hervé, Nick, Souleyman, Amhed, Antoine, Yves, François Shindo, Robert et Pierre pour son amitié et solidarité avec moi, un grand Merci!

Al Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM y a todo su personal, por las facilidades que como estudiante adscrita me han otorgado.

Al laboratorio LISA de la Universidad de París 12 por permitirme el uso de sus instalaciones.

Al Sr. Salvador Ham Lizardi por la realización tan diligente de los reactores de vidrio utilizados.

Al Físico Francisco García Flores por el incondicional apoyo que siempre me proporcionó para la irradiación de las muestras en la fuente de ^{60}Co .

Al Dr. Jaques Lafait y a la señorita Anabella da Silva por apoyarme en la determinación de las constantes ópticas de los aerosoles de Titán.

A las familias Coll y Feneteaux por hacer más divertidos mis días en Francia.

Este trabajo de tesis que representa la culminación de mi formación académica y que me permite concluir con una etapa muy significativa de mi vida profesional, se lo dedico con todo mi cariño a mi madre Pilar, a mi padre Teodoro, a mis hermanos José Alfredo, Luis Teodoro y Juan Antonio, así como a sus esposas Selene, Lilia y Lourdes, a mis sobrinos Jorge Alfredo, Paola Liliana y Selene Monserrat, a mi abuela Eleuteria y a mi amiga Liliana. Sin el constante apoyo, afecto y confianza que me han brindado hubiera sido muy difícil llegar a la meta y mucho de lo que soy se los debo a Ustedes, gracias!!!

RESUMEN

Titán, el satélite más grande de Saturno y el único en poseer una atmósfera densa, es uno de los cuerpos planetarios más interesantes del Sistema Solar debido a la Química que se desarrolla entre sus constituyentes atmosféricos principales, nitrógeno molecular y metano. En la transformación de estas especies químicas participan varias fuentes de energía cuyo efecto neto varía en los diferentes niveles de la atmósfera. En la parte alta la radiación ultravioleta y las partículas energéticas provenientes de la magnetosfera de Saturno son los principales agentes de transformación química. En los niveles medio y bajo de la atmósfera, el metano, nitrógeno y algunos de los productos primarios sencillos, participan en procesos secundarios de transformación iniciados por la eventual entrada de meteoritos y por el probable desarrollo de algún tipo de actividad eléctrica que ocurra entre las nubes de metano y que funcione como el mecanismo de disipación de energía en la atmósfera baja. La única fuente de transformación que cuenta con la energía suficiente para recorrer toda la atmósfera son los rayos cósmicos, los cuales pueden actuar sobre los productos orgánicos depositados sobre y en la superficie rocosa del satélite. Como parte de los procesos de transformación secundarios se incluye la evolución de los productos en fase gaseosa hacia la formación de las partículas sólidas que constituyen a los aerosoles de la cubierta atmosférica densa y opaca que rodea al satélite y que le proporciona su característico color naranja.

Los principales objetivos del presente trabajo de tesis incluyen el análisis químico cualitativo y cuantitativo de las especies químicas sintetizadas en fase gaseosa por fuentes energéticas que simulan los procesos de transformación que ocurren en la atmósfera de Titán y la estimación de las constantes ópticas de un compuesto sólido análogo de los aerosoles estratosféricos del satélite.

La atmósfera baja se representó con una mezcla gaseosa de metano y nitrógeno (1:9) a 670 mbar y 293 K. Los rayos cósmicos y los electrones energéticos provenientes de la magnetosfera de Saturno se simularon irradiando a la atmósfera representativa con una fuente de radiación gamma. La posible entrada de meteoritos se representó mediante el plasma inducido por un haz láser incidente sobre la atmósfera simulada. El desarrollo de descargas eléctricas de tipo corona y de tipo arco se simuló utilizando un generador eléctrico que produce este tipo de fenómenos eléctricos. De acuerdo a la fuente energética utilizada, el tiempo de irradiación varió entre algunos minutos y varios días. En todos los casos se estimó la cantidad de energía utilizada en la transformación química de los componentes de la mezcla inicial y se utilizó, junto con gráficas de calibración, para calcular los rendimientos energéticos de los diferentes productos. La separación e identificación de los productos sintetizados se realizó utilizando un sistema acoplado de cromatografía de gases-espectrometría de masas-espectrofotometría de infrarrojo. Los productos químicos identificados incluyen hidrocarburos

y nitrilos. Su distribución y abundancia es función del tipo de energía utilizada. Las descargas corona reportan una producción preferencial de hidrocarburos saturados y ramificados, mientras que las descargas de tipo arco originan hidrocarburos con enlaces insaturados conjugados y compuestos aromáticos. El plasma produce principalmente alquinos y derivados del benceno. La radiación gamma reporta la producción de hidrocarburos saturados e insaturados, así como de compuestos aromáticos. Las especies con el mayor rendimiento energético incluyen al etano (C_2H_6), eteno (C_2H_4), etino (C_2H_2), propano (C_3H_8), metanonitrilo (HCN), etanodinitrilo (C_2N_2) y etanonitrilo (CH_3CN).

Las gráficas de producción en fase gaseosa de los compuestos que contienen de 2 a 4 átomos de carbono indican que estos productos alcanzan un valor máximo de formación después del cual inician la formación de compuestos mayores y más complejos que finalmente resultan en la formación de las partículas sólidas que forman a los aerosoles de Titán. Para sintetizar un análogo altamente representativo de los aerosoles de la atmósfera alta de Titán se utilizó una mezcla gaseosa de 2% de metano en nitrógeno que fluyó constantemente, a 1 mbar y 293 K, por el interior de un reactor de vidrio Pyrex. Películas delgadas del análogo de los aerosoles se depositaron sobre placas de cuarzo al irradiar, durante 2 y 4 horas, a la mezcla gaseosa con una descarga eléctrica luminosa que simula las reacciones iniciadas por fotólisis e impacto electrónico en la atmósfera alta del satélite. La variación de la transmitancia y reflectancia de las muestras sólidas se midió, en el intervalo de 200 a 900 nm, utilizando un espectrofotómetro. La apariencia general de las gráficas obtenidas reproduce el comportamiento óptico de los aerosoles atmosféricos de Titán. Utilizando esta información se calcularon el índice de refracción (n) y el coeficiente de extinción (k), los dos parámetros que forman al índice de refracción complejo. Se realizó un estudio del efecto que produce el cambio de algunas propiedades intrínsecas de los análogos de aerosoles como la variación del grosor de la película, su porosidad y la cantidad de radiación que dispersa, en el valor absoluto de los parámetros n y k . En el intervalo de 200 a 900 nm el índice de refracción (n) varía entre 1.63-1.52 y el coeficiente de extinción (k) varía entre 3.5×10^{-2} y 1×10^{-3} . Los valores finales de n y k se presentan como una nueva referencia en la interpretación de los fenómenos de absorción y distribución de la radiación solar que ocurren en la atmósfera y en la definición de las características de la superficie de Titán.

El conjunto de los resultados obtenidos en los estudios de la fase gaseosa y sólida es de particular importancia en la interpretación de los análisis de la atmósfera de Titán que realizará *in vivo* la sonda Huygens en el año 2004.

ABSTRACT

Titan is the only satellite in the Solar System that has a dense atmosphere mainly constituted by molecular nitrogen and methane, which is transformed by different energy sources. In the upper atmosphere, the solar ultraviolet radiation and the high energy particles from Saturn's magnetosphere are the principal sources of chemical transformation. In the lower atmospheric levels, the methane, nitrogen and some of the initial compounds take part in secondary transformation processes. These processes may be initiated by the entrance of meteorites and the probable development of electrical activity within the methane clouds postulated for the troposphere. Galactic cosmic rays are the only source that is energetic enough to travel through all the atmosphere and act at the surface level. The secondary transformation processes include the evolution of the products from the gas phase to solid particles. These particles form the dense layers that surround the satellite and give its characteristic orange color.

The present thesis work has two main objectives: the qualitative and quantitative analysis of the gas-phase products formed by different energy sources that simulate the chemistry in the atmosphere of Titan and the estimation of the optical constants from a solid compound, analogue to the stratospheric aerosols.

A gas mixture of nitrogen and methane (9:1) at 670 mbar and 293 K, was subjected to the action of gamma radiation, a laser induced plasma, arc and corona discharges. The separation and identification steps were performed with a coupled GC-MS-IRS(FT) system. The identified products include saturated and unsaturated hydrocarbons, nitriles and aromatic derivatives. The products with the highest energy yields are the ethane, ethene, ethyne, propane, methanonitrile, ethanonitrile, and ethanodinitrile. From a mixture of 2% methane in nitrogen, a transparent film of organic compounds was obtained. The values of transmittance and reflectance measured from 200 to 900 nm allowed the calculation of the parameters of the complex refractive index. The values of the refractive index (n) are within 1.63-1.52, while those of the extinction coefficient varied from 3.5×10^{-2} to 1×10^{-3} . The set of values is presented as a new reference for the interpretation of the solar radiation absorption and distribution in the atmosphere.

All the information obtained in the experiments of gas- and solid-phase is of particular importance for the interpretation of the information send by the Huygens probe in the year 2004, when it performs an *in vivo* study of the atmospheric profile.

RESUMÉ

Titan possède une atmosphère dense, siège d'une chimie organique active. Cette étude comparative de l'irradiation d'une atmosphère simulée de Titan par différentes sources d'énergie simulant les processus intervenant *in-situ*, présente également une étude de l'indice complexe de réfraction (ICR) d'analogues des aérosols trouvés dans la stratosphère du satellite.

Cette atmosphère a été simulée dans un mélange N₂:CH₄ (9:1). Des rayons γ , un plasma induit par laser (LIP), ainsi que des décharges d'arc et corona ont simulé l'effet de rayons cosmiques, la possible entrée de météorites et les phénomènes électriques. L'identification fut réalisée par un système CPG-SM-IRTF, et les taux de production de 36 hydrocarbures et 7 nitriles ont été déterminés. Les décharges corona produisent des hydrocarbures saturés et ramifiés. Les décharges d'arc sont à l'origine d'hydrocarbures conjugués ou ramifiés. Le LIP produit des alcynes et des dérivés du benzène. Les rayons γ produisent des hydrocarbures divers. Ces résultats permettent d'identifier les formes d'énergie existant selon le niveau atmosphérique, ainsi que de proposer l'existence de décharges électriques, liées aux nuages troposphériques de méthane.

Des analogues d'aérosols stratosphériques ont été obtenus à partir de mélanges irradiés par une décharge silencieuse. Leur indice complexe de réfraction fut calculé à partir de mesures de réflectance et transmittance entre 200 et 900 nm. L'indice de réfraction varie entre 1,63 et 1,52, et le coefficient d'extinction entre $3,5 \times 10^{-2}$ et 1×10^{-3} . Les effets liés à l'épaisseur de film, à la porosité et la diffusion de la lumière sur les valeurs finales ont été estimés. Ce jeu de données ICR est présenté comme une nouvelle référence pour interpréter l'albedo géométrique de Titan, la dynamique atmosphérique et la composition de la surface.

Ces deux jeux de résultats sont de la plus grande importance pour l'interprétation des données provenant de l'exploration de l'atmosphère par la sonde Cassini-Huygens en 2004.

CONTENIDO

1. INTRODUCCION	1
1.1. TITAN, UNICO SATELITE POSEEDOR DE UNA ATMOSFERA.....	1
1.2. INTERIOR DE TITAN	2
1.3. SUPERFICIE DE TITAN	4
1.4. ORIGEN DE LA ATMOSFERA DE TITAN	5
1.5. CONSTITUYENTES DE LA ATMOSFERA DE TITAN	7
1.6. LA ESTRUCTURA TERMICA DE LA ATMOSFERA DE TITAN	9
1.7. FUENTES DE ENERGIA DE LA ATMOSFERA DE TITAN	11
1.7.1. RADIACION COSMICA	12
1.7.2. DESCARGAS ELECTRICAS	13
1.7.3. PLASMAS DE ALTAS TEMPERATURAS	16
1.8. LOS AEROSOLES DE TITAN	18
1.9. NUBES Y LLUVIA DE METANO EN LA TROPOSFERA DE TITAN	20
1.10. EVOLUCION DE LA ATMOSFERA DE TITAN	27
2. OBJETIVOS	29
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL	32
3.1. PREPARACION DE LA ATMOSFERA DE TITAN	32
3.1.1. PREPARACION DE LA TROPOSFERA SIMULADA DE TITAN	32
3.1.2. PREPARACION DE LA ESTRATOSFERA SIMULADA DE TITAN	35
3.2. DISEÑO DE LOS REACTORES UTILIZADOS	36
3.2.1. REACTOR DE LAS DESCARGAS CORONA	36
3.2.2. REACTOR DE LAS DESCARGAS DE ARCO	36
3.2.3. REACTOR DEL PLASMA INICIADO POR UN HAZ LASER	39
3.2.4. REACTOR DE LA RADIACION GAMMA	39
3.2.5. ANALOGOS DE LOS AEROSOLES ESTRATOSFERICOS	40

3.2.6. LIMPIEZA DE LOS REACTORES	41
3.3. INSTRUMENTOS UTILIZADOS EN LA IRRADIACION	42
3.3.1. DESCARGAS CORONA Y DE ARCO	42
3.3.2. PLASMA INICIADO POR UN HAZ LASER	42
3.3.3. RADIACION GAMMA	43
3.3.4. DESCARGA LUMINOSA	43
3.4. CONDICIONES DE LAS IRRADIACIONES Y CALCULO DE LA ENERGIA DISIPADA	43
3.4.1. DESCARGAS CORONA	44
3.4.2. DESCARGAS DE ARCO	46
3.4.3. RADIACION GAMMA	49
3.4.4. PLASMA INICIADO POR UN HAZ LASER	50
3.4.5. DESCARGA LUMINOSA	51
3.5. SINTESIS DE LOS ANALOGOS DE AEROSOLES	52
3.5.1. DETERMINACION DEL GROSOR DE LAS MUESTRAS	53
3.5.2. MEDICIONES DE TRANSMITANCIA Y REFLECTANCIA	53
3.5.3. CALCULO DEL INDICE DE REFRACCION COMPLEJO	54
3.6. CONDICIONES DEL ANALISIS CUALITATIVO Y CUANTITATIVO	55
4. RESULTADOS Y DISCUSION	60
4.1. TRANSFORMACION QUIMICA DE LA TROPOSFERA SIMULADA DE TITAN	60
4.2. CALCULO DEL INDICE DE REFRACCION COMPLEJO DE UN ANALOGO DE LOS AEROSOLES DE TITAN	81
5. CONCLUSIONES	96
6. APENDICES	98
7. REFERENCIAS	124

1. INTRODUCCION

1. 1. Titán, único satélite poseedor de una atmósfera

Titán, uno de los 18 satélites naturales del planeta Saturno y segundo en tamaño dentro del Sistema Solar, es el único en poseer una atmósfera densa y fría. Fue descubierto en 1655 por el astrónomo Christian Huygens. Las propiedades físicas y astronómicas del satélite como se conocen hoy en día se resumen en la Tabla 1. La distancia de Titán respecto al Sol, lo convierte en un cuerpo frío y opaco al que solo llega el 1.1% de la radiación solar, respecto al valor de la Tierra. La órbita que describe el satélite alrededor de Saturno lo ubica dentro de la magnetosfera del planeta durante un período relativamente corto pero suficiente para que exista una entrada importante de partículas energéticas hacia la atmósfera. La atmósfera del satélite se extiende hasta 1600 km y presenta, al igual que la atmósfera terrestre, una estructura térmica con temperaturas absolutas mucho menores. La densidad del núcleo de Titán sugiere que su interior esta formado por cantidades semejantes de hielos y rocas.

La atmósfera de Titán fue descubierta en 1907 por el astrónomo español José Comas Solá al observar cambios en la intensidad luminosa de algunas zonas del disco del satélite e inferir que estos cambios debían corresponder con la presencia de una atmósfera, misma que fue confirmada en 1944 por Gerald Kuiper (1944) al descubrir dos bandas de absorción, en 6190 Å y 7250 Å, correspondientes a metano. Kuiper presentó a este gas como el componente principal de la atmósfera. Estudiando el espectro de emisión térmica de Titán, Gillett *et al.* (1973) y Gillett (1975) encuentran evidencia no solo de la presencia de metano, sino también de etano, metano deuterado, eteno y etino. Anterior al encuentro de la nave Viajero con Titán, las opiniones acerca de la identidad del componente principal de la atmósfera se encontraban divididas. Danielson *et al.* (1973) y Cadwell (1977) pensaban en una fracción mol de 90% de metano, una temperatura de 86 K y una presión de 20 mbar en la superficie. Lewis (1971) y Hunten (1977) esperaban que la disociación fotoquímica del amoniaco, un gas afanosamente buscado en Titán, hubiera producido grandes cantidades de nitrógeno molecular de manera que fuera este el principal constituyente y que las condiciones de la superficie fueran de 200 K y 20 bar de presión. Es hasta

1980 cuando la nave Viajero 1 realiza el análisis de la atmósfera y determina que esta formada principalmente de nitrógeno molecular, que su presión es de 1.5 veces la terrestre y que el valor de la temperatura en la superficie es de 94 K.

Tabla 1. Características físicas y astronómicas de Titán*

Distancia al Sol	9.546 UA
Distancia a Saturno	1.226×10^6 km
Tiempo de rotación	15.95 días terrestres
Tiempo de traslación	30 años terrestres
Oblicuidad	$26^\circ 7'$
Radio	2575 km
Masa	1.346×10^{23} kg (0.022 × Tierra)
Presión superficial	1496 ± 20 mbar
Gravedad superficial	135 cm s^{-2}
Densidad media	1.881 g cm^{-3}
Proporción roca:hielos (en masa)	52:48
Albedo	0.20
Radiación solar recibida	1.1% del valor de la Tierra
Temperatura (K)	
Superficie	94
Tropopausa (42 km)	73.5
Estratopausa (200 km)	170
Exobase (1600 km)	186 ± 20

*Hunten *et al.*, (1984)

1. 2. Interior de Titán

El núcleo de Titán consiste principalmente de material rocoso, en su mayoría silicatos transportados hacia el centro del satélite durante las últimas etapas de la acreción, cuando las temperaturas del interior permitieron la migración de los hielos primarios a las capas superiores (Fig. 1). Al núcleo le sigue una capa de hielo de agua, la cual constituye cerca del 30% del total de la masa del satélite y contiene cantidades considerables de amoníaco (Grasset y Sotin, 1996). A unos 300 kilómetros por debajo de la superficie puede encontrarse un océano subterráneo de hielos de amoníaco y agua derretidos debido a un efecto de transporte de calor desde la superficie que facilita la formación de una mezcla con la viscosidad suficiente para poder fluir libremente

por los canales subterráneos (Stevenson, 1992). En Titán la mezcla eutéctica amoniaco-agua, actúa de manera similar al magma terrestre. Este magma titaniano puede migrar, en condiciones específicas, hacia la capa formada por el hielo de agua I, enriqueciéndolo con amoniaco, y llegar hasta la superficie. Esto es muy importante en lo que respecta a la química del satélite y a su morfología (Lunine *et al.*, 1998). La capa de hielo I probablemente contiene también clatratos de metano y bolsas de metano líquido o gaseoso. La última capa, es la porción de Titán expuesta y en contacto directo con la atmósfera y esta constituida probablemente por un hielo poroso que alberga metano líquido y otros compuestos orgánicos como hidrocarburos y nitrilos (Stevenson, 1982).

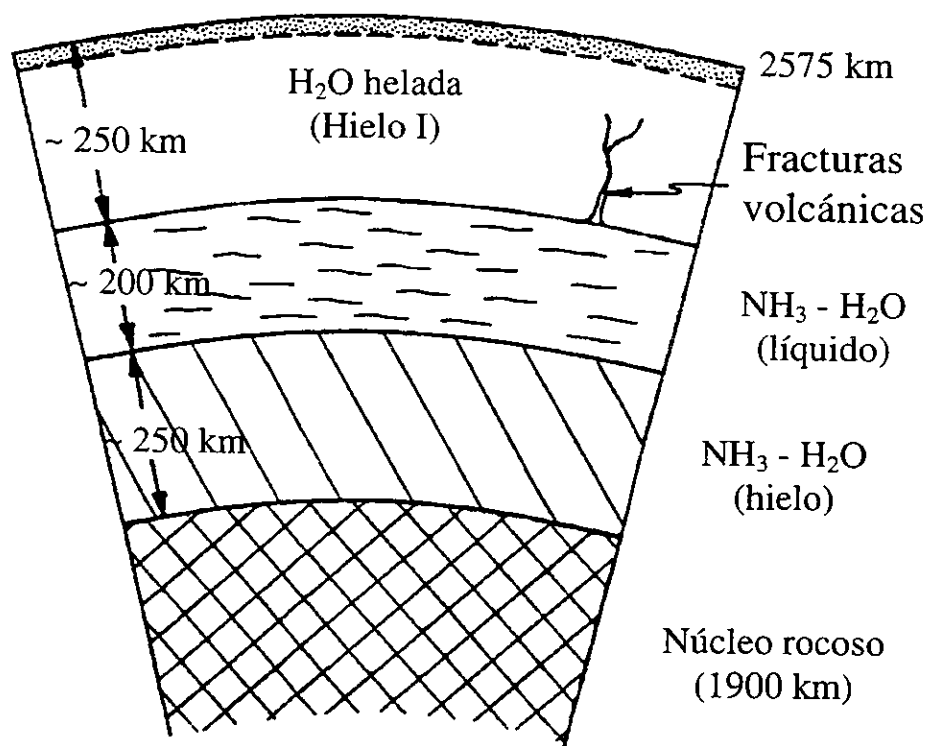


Figura. 1. Modelo actual del interior de Titán. El modelo supone que el satélite se formó a partir de un ambiente reductor rico en amoniaco (Stevenson, 1992).

1. 3. Superficie de Titán

Durante el encuentro de las naves Viajero con Titán, en la década de los 80's, la superficie del satélite representó una gran incógnita ya que no pudo visualizarse debido a la presencia de las capas de brumas de la estratosfera. Las primeras observaciones de la superficie de Titán se han realizado desde la Tierra gracias al monitoreo realizado por emisiones de radiofrecuencia (Muhleman *et al.*, 1991) y a las observaciones en el infrarrojo cercano y en la región visible (Griffith *et al.*, 1991; Coustenis y Bézard, 1995; Gibbard *et al.*, 1999) que fueron capaces de traspasar la barrera de las brumas que envuelven al satélite. El conjunto de datos observacionales ha permitido dividir a la superficie del satélite en dos regiones distintas, la correspondiente a una superficie brillante, cuyas

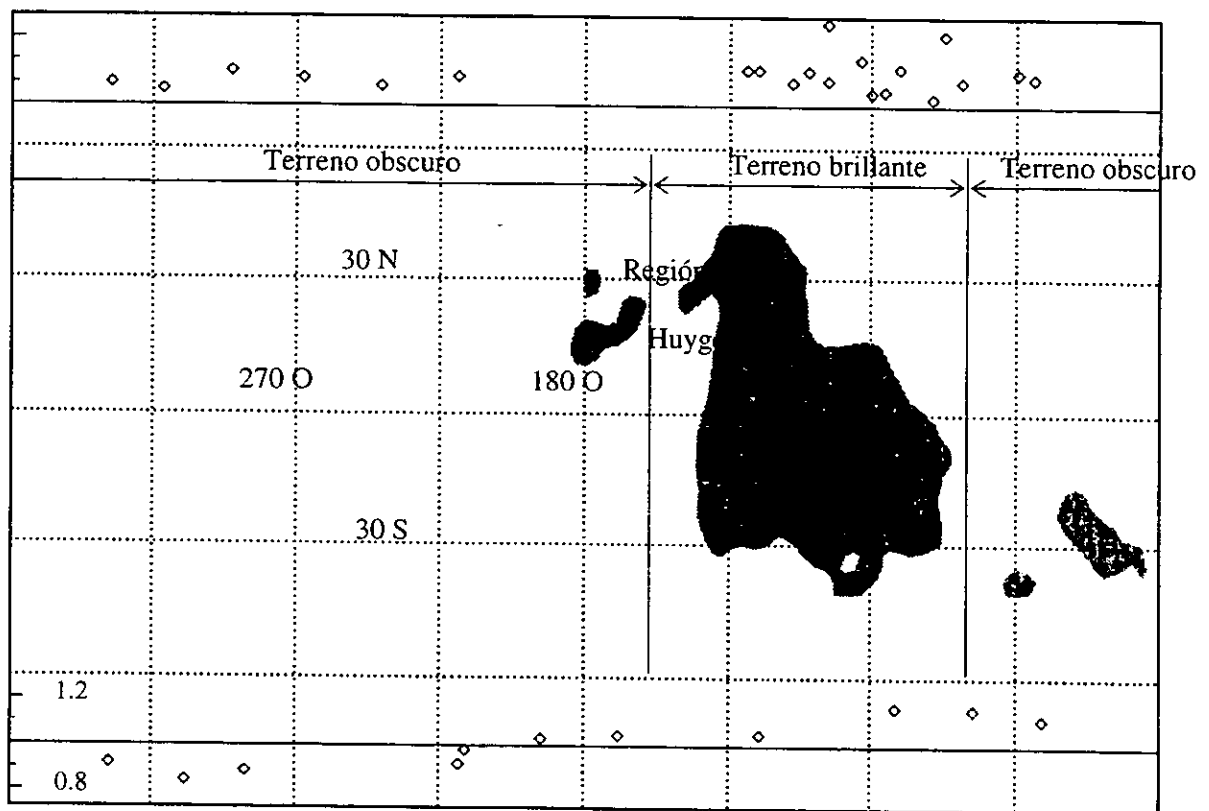


Figura 2. Proyección cilíndrica del mapa de la reflectividad de la superficie de Titán a 940 nm derivado a partir de la información adquirida por el filtro F850LP del telescopio espacial Hubble (HST) (Smith *et al.*, 1996).

dimensiones (2000×4000 km) son comparables con la superficie ocupada por Australia, en la Tierra, y el resto del satélite que comprende algunas otras regiones pequeñas de alta reflectividad. La superficie brillante se localiza entre 60° y 160° longitud oeste y se extiende simétricamente 30° desde el ecuador como se ilustra en la Fig. 2. Observaciones complementarias de esta gran región brillante indican que puede tratarse de una superficie continental sólida cubierta por agua helada (Smith *et al.*, 1996; Combes *et al.*, 1997) o bien puede tratarse de una gran concentración de hielos de agua (Lemmon *et al.*, 1993; Coustenis y Bézard, 1995). La porción del satélite ajena a la región brillante, puede estar constituida por un océano contaminado con espumas de aerosoles, mares pequeños no globales de hidrocarburos, o zonas de superficies secas combinadas con lagos (Lunine, 1993).

La presencia de depósitos líquidos en la superficie de Titán tiene importantes implicaciones ya que estos podrían constituir la reserva requerida por los productos de transformación fotolítica y radiolítica de los constituyentes principales de la atmósfera. De estar formados por estos productos, los depósitos aparecerían como regiones muy oscuras, con albedos ≤ 0.02 , detectables a través de las ventanas de metano ubicadas en longitudes de onda específicas de la región del infrarrojo (Coustenis y Bézard, 1995).

1. 4. Origen de la atmósfera de Titán

La atmósfera de Titán es más densa que la de planetas más masivos que él como la Tierra, Marte y Mercurio. El origen de esta atmósfera es el resultado de la combinación de dos casos extremos, la mayor parte proviene de la acumulación, en los hielos del interior del satélite, de los gases remanentes de la nebulosa de Saturno y una pequeña fracción, ha sido aportada por los impactos cometarios sufridos durante o después de la formación del satélite como lo demuestran Griffith y Zahnle (1995), quienes analizando la distribución de la población de los cometas en el Sistema Solar, han encontrado en la mayoría de las simulaciones efectuadas, que el 10% de la atmósfera de Titán es de origen cometario.

Una característica interesante de la atmósfera de Titán es que su componente principal es el mismo que el de la atmósfera terrestre, nitrógeno molecular. Considerando que la mayor parte de la atmósfera proviene del degasamiento de los hielos del interior del satélite, las primeras ideas acerca de la naturaleza del material que se condensó para formar a Titán proponían hielos ricos en nitrógeno (Owen, 1982). La proporción Ar/N_2 , un parámetro diagnóstico de las diferentes reservas químicas primordiales, demuestra que es muy poco probable que el nitrógeno molecular haya estado presente en cantidades abundantes durante la etapa de acreción del material que

formaría a Titán. Es mucho más probable que los hielos de la nebulosa Saturniana contuvieran amoniaco, un compuesto menos volátil que el nitrógeno, mucho más abundante en la nebulosa primitiva del Sistema Solar exterior y más fácil de acretar durante la consolidación del satélite. El nitrógeno aparecería tiempo después, como producto de la fotólisis del amoniaco (Atreya *et al.*, 1978) originando una atmósfera secundaria.

Una prueba química complementaria acerca del origen de la atmósfera consiste en calcular la proporción D/H. Para la atmósfera de Titán, esta tiene un valor de $7.75 \pm 2.25 \times 10^{-5}$ según las observaciones realizadas en forma directa (Coustenis *et al.*, 1998) o desde la Tierra (Orton, 1992). Este valor es ligeramente mayor que el de la atmósfera de Saturno, $2.7 \pm 0.7 \times 10^{-5}$, pero menor por un factor de 4, que el calculado para el agua de los cometas Halley, Hyakutake y Hale-Bopp (Lecluse *et al.*, 1996). Estos hechos apoyan la idea de que Titán se formó a partir de la nebulosa Saturniana, que su atmósfera tiene un origen principalmente local y que el ligero enriquecimiento en deuterio que se observa en la atmósfera actual puede explicarse por el depósito de material cometario, la probable captación de metano enriquecido en deuterio al inicio de su formación (Gautier y Morel, 1997) o bien debido al fraccionamiento fotolítico del metano que favorece la disociación del enlace C-H sobre el enlace C-D (Pinto *et al.*, 1986).

Titán constituyó una atmósfera que ha logrado mantener gracias a una serie de eventos combinados (Taylor y Cousténis, 1998). Se cree que el material que lo constituye proviene de la parte más fría de la nebulosa Saturniana, favoreciendo el aporte de hielos de metano, amoniaco y agua para el posterior desarrollo de una atmósfera. En las primeras etapas del aumento másico de Titán ocurrió una diferenciación interna del material, concentrándose los hielos cerca de la superficie y el material más rocoso al centro. Los hielos tenían entonces mayores posibilidades de degasarse quedando algunos gases atrapados por la fuerza de gravedad formando la capa atmosférica primaria, de cuya fotodegradación, surgió la atmósfera actual. La temperatura de la superficie (Tabla 1) ha permitido la acumulación paulatina de cantidades significativas de los constituyentes volátiles como el amoniaco, el metano y el monóxido de carbono que estaban en un principio, atrapados debajo de capas de agua helada y migraron hacia la superficie a través de rupturas o "criovolcanes". La órbita que describe Titán alrededor de Saturno lo mantiene alejado de la magnetosfera del planeta en la mayor parte del recorrido, la acumulación de la atmósfera ha ocurrido casi libre de perturbaciones de partículas altamente energéticas. La atmósfera de Titán es más densa que las atmósferas de la Tierra o de Marte por que durante la etapa en la que estos planetas eran objeto de un fuerte bombardeo meteorítico que empobrecía sus atmósferas, la atmósfera de Titán estaba congelada y permanecía ajena a este bombardeo. Se considera también

que en épocas relativamente recientes, la atmósfera de Titán ha recibido un abastecimiento más eficiente de material cometario volátil en comparación con el que recibieron los planetas interiores del Sistema Solar.

1. 5. Constituyentes de la atmósfera de Titán

Las observaciones y análisis realizados por el instrumental de las naves Viajero 1 y 2 mejoraron significativamente el actual conocimiento de la composición de la atmósfera de Titán. Ahora se sabe con certeza que su peso molecular medio es de 28.6 uma y que contiene especies químicas de abundancia variable en fase gaseosa y sólida que evolucionan constantemente debido a la acción de diferentes fuentes de energía (Hunten *et al.*, 1984). El espectrómetro de ultravioleta (UVS), a bordo de la nave Viajero 1, estableció la presencia de nitrógeno molecular como componente principal (90-97%) y de hidrógeno atómico y molecular (0.2%) a altitudes de entre 500 y 1500 km. Después del nitrógeno, el metano es la especie más abundante (0.5-3.4% en la estratosfera), como lo demostraron las observaciones del espectrómetro de infrarrojo (IRIS) que proporcionaron además un espectro con múltiples señales (Fig. 3) correspondientes a compuestos orgánicos, producto de las reacciones químicas inducidas entre el nitrógeno y el metano por las diferentes fuentes de energía que se depositan en Titán (Fig. 5). Entre estos compuestos, listados en la Tabla 2, se incluyen hidrocarburos ligeros, nitrilos y compuestos oxigenados con abundancias variables y con un enriquecimiento general, más notorio en los nitrilos que en los hidrocarburos, hacia alguno de los polos (Coustenis y Bézard, 1995). Este efecto se debe a los cambios de estación propios del satélite que ocasionan que un hemisferio reciba a la radiación solar de manera mucho más eficiente que el otro y se asocia también con las bajas temperaturas existentes en esta zona. Después del metano, los siguientes cuatro hidrocarburos más abundantes son el etano, propano, etino y eteno, en este orden. Cada uno de ellos puede condensarse en algún nivel de la estratosfera y sedimentar hacia la superficie, reduciendo de esta manera su abundancia en fase gaseosa en la atmósfera (Coustenis *et al.*, 1995).

Las moléculas oxigenadas de la atmósfera de Titán, CO, CO₂ y H₂O, se han incorporado a la atmósfera a partir de residuos de material cometario o de otros satélites del sistema de Saturno (Taylor y Cousténis, 1998). El CO pudo haber sido captado por el núcleo de Titán a partir de la nebulosa original y posteriormente incorporarse a la atmósfera. Estas tres moléculas están relacionadas entre sí mediante los procesos físicos y químicos que ocurren en el satélite. Por ejemplo, la fotólisis del agua produce iones OH y la del metano produce radicales CH₃, entre otros, estas especies reaccionan entre sí y producen CO, que puede generar CO₂ al reaccionar con

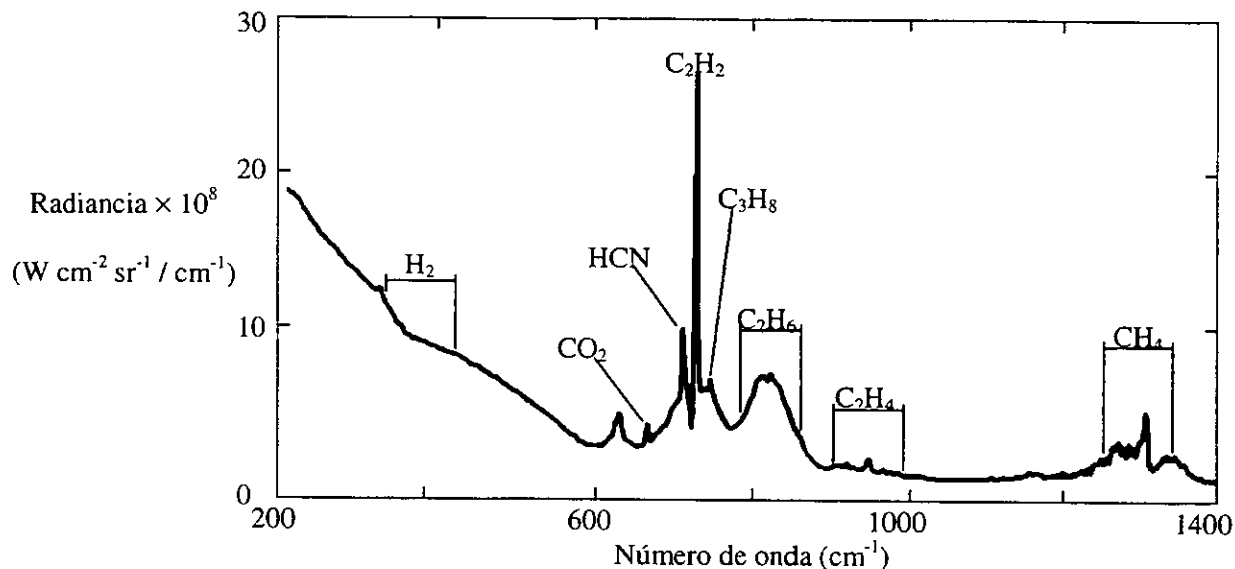


Figura 3. Espectro de la atmósfera de Titán, correspondiente al promedio de 346 lecturas, obtenido por el espectrómetro IRIS durante el sobrevuelo del satélite a una distancia de 2/3 de su diámetro (Samuelson, 1983).

un radical OH. El dióxido de carbono producido puede congelarse en la atmósfera baja y formar un depósito de ~1 m de espesor, o bien regenerar CO (Taylor y Coustenis, 1998).

La primera molécula oxigenada detectada en Titán fue el CO₂ (Samuelson *et al.*, 1981). El CO fue detectado mediante observaciones en el infrarrojo cercano realizadas desde la Tierra (Lutz *et al.*, 1983). El vapor de agua detectado mediante observaciones en la región del infrarrojo lejano indican una abundancia del orden de unas cuantas décimas de partes por billón (Coustenis *et al.*, 1998), por lo tanto se considera que la estratosfera de Titán es extremadamente seca. Se espera que la troposfera tenga un mayor contenido de agua, debido principalmente al contacto que puede tener con la superficie, la cual se cree que esta formada por una considerable cantidad de hielos de agua (Cousténis *et al.*, 1989; Griffith *et al.*, 1991).

La abundancia del hidrógeno atómico y molecular en la atmósfera de Titán es muy baja debido a que su escape es inevitable. La temperatura de la estratosfera, más elevada que en las regiones bajas de la atmósfera (Fig. 4), y la débil atracción gravitacional del satélite hacia este gas son los principales factores del escape, el cual se ha calculado en 1×10^{10} átomos $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ para los 3500 km (Allen *et al.*, 1980) y se estima que es suficiente para formar el toroide detectado alrededor de Titán

Tabla 2. Abundancias de los constituyentes de la estratosfera de Titán*

Constituyente	Formula molecular	Fracción mol en el ecuador (en el polo norte)
Nitrógeno	N ₂	0.90-0.97
Metano	CH ₄	0.10-0.02
Hidrógeno	H ₂	0.002
Argón	Ar	0.00-0.06**
Etino	C ₂ H ₂	$1.9 \pm 0.2 \times 10^{-6}$ (3.5×10^{-6})
Eteno	C ₂ H ₄	$8.0 \pm 2.0 \times 10^{-8}$ (3.0×10^{-5})
Etano	C ₂ H ₆	$1.3 \pm 0.5 \times 10^{-5}$ (1.6×10^{-5})
Propino	C ₃ H ₄	$8.0 \pm 1.5 \times 10^{-9}$ (4.1×10^{-8})
Propano	C ₃ H ₈	$5.0 \pm 2.0 \times 10^{-7}$ (5.0×10^{-6})
1,3-Butadi-ino	C ₄ H ₂	$1.5 \pm 0.2 \times 10^{-9}$
1,2-Propadieno	C ₃ H ₄	$<5.0 \times 10^{-9}$
Benceno	C ₆ H ₆	$<6.0 \times 10^{-9}$
Metanonitrilo	HCN	$1.5 \pm 0.2 \times 10^{-7}$ (1.4×10^{-6})
Propinonitrilo	HC ₃ N	$<1 \times 10^{-9}$ (1.7×10^{-7})
Etanodinitrilo	C ₂ N ₂	$<1.5 \times 10^{-9}$ (1.1×10^{-8})
Dióxido de carbono	CO ₂	$1.5 \pm 0.1 \times 10^{-8}$ ($\leq 7.0 \times 10^{-7}$)
Monóxido de carbono	CO	$4 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-5}$
Agua	H ₂ O	$4.0 \pm 2.0 \times 10^{-10}$
Metano-d	CH ₃ D	$5.7 \pm 3.1 \times 10^{-6}$

*Taylor y Cousténis (1998); **Courtin *et al.* (1995)

a distancias de entre 8 y 25 radios de Saturno (Hunten *et al.*, 1984). La principal consecuencia de este escape es la formación de un ambiente químico en el cual el metano es convertido irreversiblemente en hidrocarburos menos ricos en hidrógeno a lo largo del tiempo geológico.

1. 6. La estructura térmica de la atmósfera de Titán

Titán se encuentra nueve veces más lejos del Sol que nuestro planeta, sin embargo, la estructura térmica de su atmósfera se asemeja mucho a la de la Tierra, aunque es en general mucho más fría (Fig. 4). Titán emite al espacio una temperatura efectiva de 83 K, esto quiere decir que absorbe aproximadamente el 73% de la energía solar que recibe en la atmósfera alta. Esta energía es aproximadamente 100 veces menor que la que recibe la Tierra (Tabla 1). De acuerdo al análisis

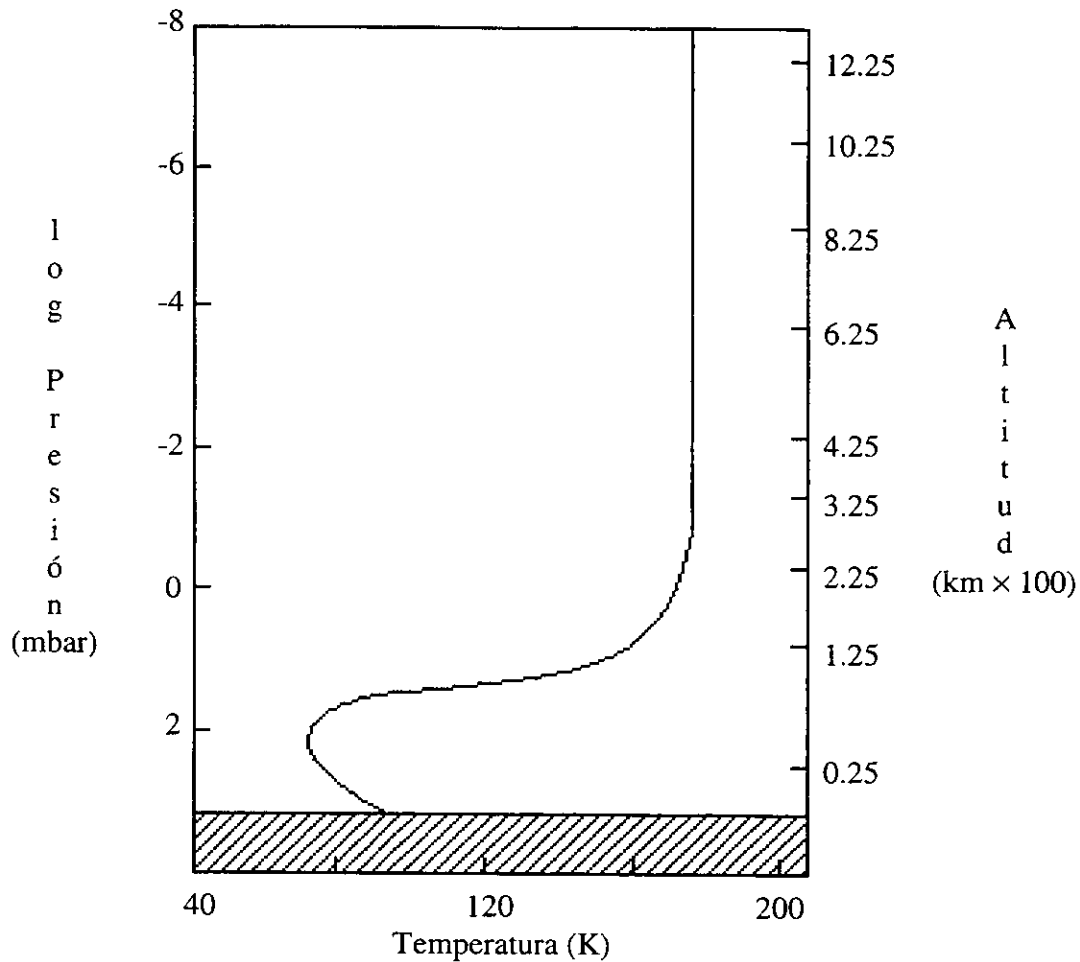


Figura 4. Perfiles de temperatura y presión de la atmósfera de Titán derivados de los experimentos realizados por la nave Viajero 1 en 1980. (Sagan *et al.*, 1992).

de la información aportada por el experimento de radio ocultación (RSS) y asumiendo una atmósfera de nitrógeno puro, Lindal *et al.* (1983) calculan una temperatura de 94 K para la superficie a una presión de 1.5 bar. La diferencia entre la temperatura efectiva y la temperatura real se debe a un moderado efecto invernadero que ocurre en la tropopausa, provocado por los aerosoles y el metano condensado a este nivel y que calienta a la superficie (McKay *et al.*, 1991). Como se ilustra en la Fig. 4, a una altura de aproximadamente 3.5 km la temperatura comienza a disminuir hasta su valor mínimo de 71 K que se registra en la tropopausa, a 42 km de altura y a una presión de 128 mbar. En este nivel ocurre una inversión de temperatura que aumenta, en el

nivel de la estratopausa, hasta 170 K. La presión calculada para esta altitud es de 100 mbar. La temperatura se mantiene a 180 (± 20) K al aumentar la altitud y llegar al límite de la atmósfera o exobase a 1600 km.

1. 7. Fuentes de energía de la atmósfera de Titán

La radiación ultravioleta, los protones del viento solar, los electrones interplanetarios, las partículas de la magnetosfera de Saturno y los rayos cósmicos son las fuentes de energía que contribuyen a la transformación actual de la atmósfera de Titán. De entre ellas, la radiación solar ultravioleta, los electrones de la magnetosfera de Saturno y los rayos cósmicos son las fuentes energéticas más significativas (Sagan y Thompson, 1984; Yung *et al.*, 1984).

Estimaciones de la energía disipada por unidad de volumen en la atmósfera de Titán por las diferentes fuentes se muestran en la Fig. 5. Por arriba de los 725 km domina el depósito de energía por parte de los fotones solares. Los electrones de la magnetosfera de Saturno depositan energía mayormente a una altitud de entre 725 y 475 km. Los protones de la magnetosfera de Saturno son una fuente de energía significativa arriba de los 525 km, aunque son menos importantes que los electrones magnetosféricos. Los electrones del viento solar o interplanetarios depositan energía por arriba de los 875 km y aunque la energía total disipada por ellos es menor que la disipada por la radiación ultravioleta, esta cantidad se vuelve un factor 20 veces mayor cuando el satélite está expuesto al viento solar. Los protones del viento solar depositan su energía por arriba de los 1325 km. Por debajo de los 625 km la radiación ultravioleta con longitudes de onda larga que se absorbe en las moléculas complejas presentes a este nivel, se vuelve la fuente de energía más significativa. Debido a la presencia de las capas de aerosoles y de las esporádicas nubes de metano, los electrones y protones energéticos, así como la radiación con longitudes de onda superiores a 100 nm quedan confinados en la parte alta de la atmósfera (Strobel y Shemansky, 1982). Es muy difícil suponer que los iones y radicales originados en la estratosfera superior por estas fuentes de energía puedan ser transportadas sin alterar su naturaleza a regiones inferiores y más densas de la atmósfera para permitir su interacción con el metano y otros hidrocarburos pequeños. Es mucho más sencillo imaginar que los iones y radicales se pueden originar por algunos otros medios como por acción de la radiación cósmica, descargas eléctricas o algún evento perturbante de la atmósfera como la entrada de bólidos a alta velocidad.

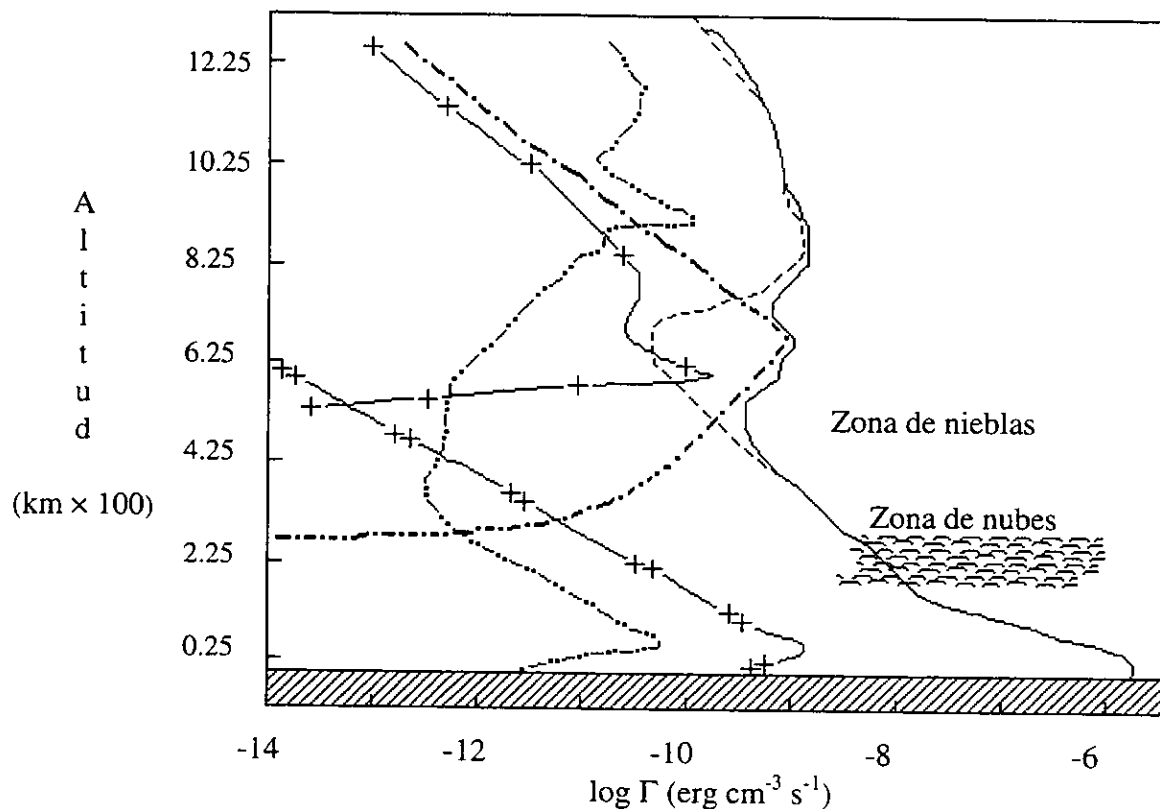


Figura 5. Variación de la energía promedio global disipada por unidad de volumen (Γ) en función de la altitud para las diferentes fuentes de energía presentes en la atmósfera de Titán. Definición de las líneas: - + - protones de la magnetosfera de Saturno, - • • - electrones interplanetarios, - • - electrones de la magnetosfera de Saturno, - + + - rayos cósmicos, - - - radiación solar UV total (la radiación solar UV de $\lambda > 155$ nm se deposita solamente por encima de la zona de nubes), _____ energía total depositada (Sagan y Thompson, 1984).

1. 7. 1. Radiación cósmica

La radiación cósmica es la segunda fuente de energía más importante cerca de la superficie de Titán (Sagan y Thompson, 1984). Este tipo de radiación, conocida también como rayos cósmicos y constituida por protones, partículas α , β y γ , es particularmente importante como promotora de la ionización en las regiones bajas de la troposfera de Titán, en donde la radiación solar que cuenta con la suficiente energía para ionizar a los constituyentes atmosféricos ha sido absorbida por los aerosoles (Molina-Cuberos *et al.*, 1999). El espectro de los rayos cósmicos demuestra que una fracción importante del flujo total de energía es transportado por las partículas que los conforman. Su energía cinética se calcula entre 1 GeV y 10 TeV y contribuyen significativamente

a los procesos de ionización y disociación de las moléculas de los constituyentes de la atmósfera baja de Titán debido a su alto poder de penetración (Capone *et al.*, 1981). Estos autores dividen a los núcleos que constituyen a la radiación cósmica en dos tipos: los que tienen una energía menor a algunos cientos de MeV y que pierden su energía mediante choques electromagnéticos de tipo Bethel-Bloch repetitivos, y los núcleos con energías superiores a 500 MeV, casi el 90% de la población, que pierden paulatinamente su energía al chocar inelásticamente con los núcleos de los constituyentes atmosféricos. Estas colisiones producen partículas secundarias como protones, neutrones, electrones y piones neutros y cargados (π^0 , π^\pm). Los rayos cósmicos pueden, en un solo choque, distribuir toda su energía y formar un gran número de partículas secundarias de menor energía. Los piones neutros decaen en cuestión de 10^{-15} segundos originando 2 rayos gamma (γ) de alta energía, los cuales distribuyen su energía a través de procesos como la producción de pares iónicos, absorción fotoeléctrica y efecto Compton (Capone *et al.*, 1981). Estos procesos constituyen la fuente de electrones de alta energía más significativa de la atmósfera. Los piones cargados (π^\pm) decaen en un tiempo de 3×10^{-8} segundos a muones cargados (μ^\pm) más neutrinos. Los muones interactúan débilmente con las primeras decenas de kilómetros de la atmósfera alta ya que cuentan con la energía (algunos GeV) y el tiempo de vida (2×10^{-8} segundos) suficientes. Posteriormente decaen a un electrón y un antineutrino. Estos, junto con los neutrinos originados a partir de los piones cargados, no interactúan con la atmósfera y su energía se pierde hacia el espacio (Capone *et al.*, 1981). De todas estas partículas, las que cuentan con la cantidad de energía y el tiempo de vida suficientes para llegar a la troposfera e iniciar reacciones químicas son las partículas gamma siendo un mecanismo de ionización y disociación efectivo entre los 50 y 185 km (Capone *et al.*, 1981; Molina-Cuberos *et al.*, 1999).

1. 7. 2. Descargas eléctricas

Los modelos propuestos para la atmósfera del satélite antes de que esta fuera formalmente analizada proponían una fracción mol de metano que oscilaba entre 0.2 y 10.4 %. Con esta cantidad de metano y las bajas temperaturas de la troposfera (Tabla 1), se especulaba acerca de la condensación de metano y consecuentemente sobre la existencia de nubes (Toon *et al.*, 1988). Si se asume que en Titán ocurren fenómenos atmosféricos similares a los que suceden en la Tierra, debe esperarse, debido a la alta densidad electrónica de la atmósfera del satélite (Grard *et al.*, 1995), la formación y separación de cargas eléctricas dentro de las nubes de metano y a consecuencia de este hecho la presencia de fenómenos de electrificación. Es de esperarse que la densidad electrónica de la atmósfera de Titán inducida por las diversas fuentes energéticas que inciden en ella, sea más grande que en la Tierra. De hecho, Lindal *et al.* (1983) encuentran un valor de 3.5×10^5 electrones cm^{-3} . Esto se explica debido a que los constituyentes de la atmósfera

del satélite tienen afinidades electrónicas muy bajas. Los iones generados por alguna fuente externa como las partículas energéticas de la magnetosfera de Saturno, la radiación cósmica o la radiación ultravioleta con $\lambda < 155$ nm, son transportados por corrientes convectivas hacia el interior de la nube, uniéndose a las partículas de aerosoles para lograr su estabilidad (Vonnegut, 1953). El dipolo eléctrico se forma cuando las partículas cargadas positivamente son transportadas por corrientes ascendentes a la cima de la nube y las partículas negativas son llevadas a la base de la nube por las corrientes descendentes.

Una vez desarrollado el dipolo dentro de la nube, las partículas cargadas eléctricamente tienden a neutralizarse ya sea al interior de la nube o bien con la superficie del satélite mediante descargas de tipo corona o bien de tipo relámpago. La colisión de un par de gotas de lluvia dentro de la nube origina una estructura con un tiempo de vida muy corto cuya forma propicia la aparición de pulsos corona, ya que facilita la colisión inelástica de los electrones libres con las moléculas del gas circundante originando iones positivos y electrones adicionales. Esto ocurre en presencia de campos eléctricos relativamente débiles (Crabb y Latham, 1974; Latham y Stromberg, 1977). Si el campo eléctrico es lo suficientemente fuerte ($> 2.4 \times 10^5$ V m⁻¹) los pulsos corona desarrollan canales corona de conducción, es decir, avalanchas electrónicas formadas por los electrones adicionales o secundarios que van a su paso, ionizando a más moléculas de gas. Los canales corona son los precursores directos de las descargas de tipo relámpago (Uman, 1987).

Debido a la presencia de nubes y de actividad convectiva en la atmósfera baja de Titán, muchos investigadores sugieren la posibilidad de encontrar algún tipo de actividad eléctrica en su troposfera (Chang *et al.*, 1979; Gupta *et al.*, 1981; Flasar, 1983; Samuelson, 1983; Lindal *et al.*, 1983; Borucki *et al.*, 1985). Observaciones realizadas con sondas espaciales indican que los relámpagos ocurren no solamente en la atmósfera de la Tierra sino también en la de Júpiter (Bar-Nun, 1975), Venus, Saturno y Urano (Borucki *et al.*, 1985). Durante el encuentro más cercano de la nave Viajero 1 con Titán, el 12 de noviembre de 1980 (Desh y Kaiser, 1990), se rastreó el 98% de la superficie del satélite en un intervalo de tiempo de 100 minutos y a una distancia de 4,394 km. Se buscaban señales de emisión, correspondientes a relámpagos, en longitudes de onda de la región de la radiofrecuencia. El instrumental estaba listo para detectar emisiones hasta 5 ordenes de magnitud más débiles que las correspondientes a un relámpago terrestre. Lo que se detectó fue radiación proveniente de la aurora de Saturno confinada a frecuencias menores a los 750 kHz. Se esperaba que en caso de encontrar emisiones de relámpagos en Titán, estas aparecerían por arriba de los 500 kHz, región transparente a la ionosfera de Titán o por encima de los 750 kHz en donde el ruido originado por la aurora de Saturno es ya extremadamente bajo.

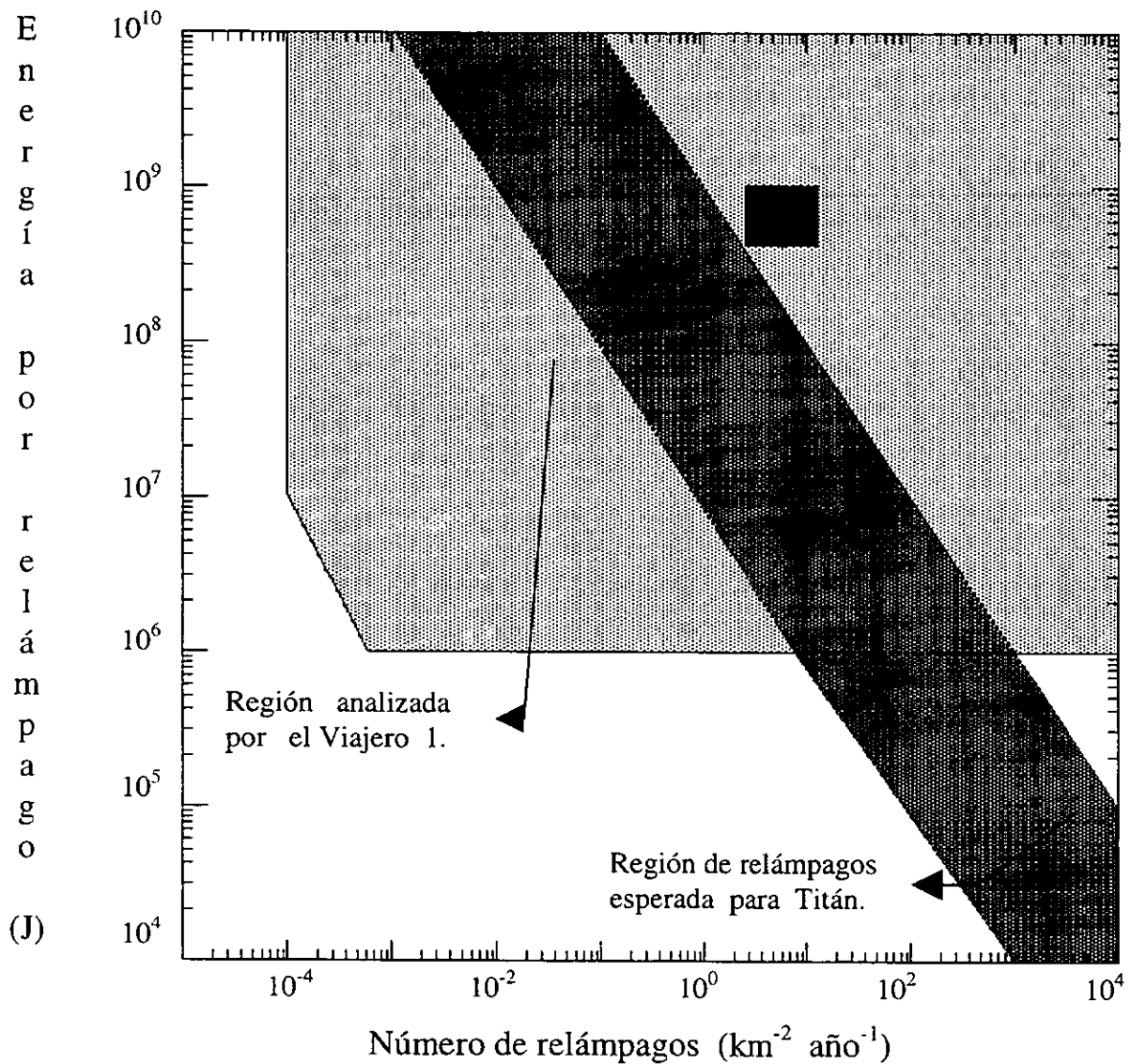


Figura 6. Regiones de ocurrencia de relámpagos en la Tierra (recuadro negro) y esperada para Titán (banda gris oscuro). Se muestran además, la región analizada (recuadro gris claro) y la no analizada (área blanca) por el instrumental de la nave Viajero 1 en noviembre de 1980 (Desh y Kaiser, 1990).

La región analizada por la nave Viajero 1 en 1980 se muestra en la gráfica de la Fig. 6. Se analizó una gran sección del área propuesta como región de relámpagos para Titán, además de la región correspondiente a los relámpagos terrestres. Sin embargo, permanece sin investigar una región del área propuesta para Titán debido a que ahí la energía que se espera se disipe tiene un valor muy por debajo del límite de detección del instrumental que estaba a bordo de la nave. Esta

región comprende energías menores a 10^6 joules y una ocurrencia de relámpagos mayor a 100. Si el cálculo de Borucki *et al.* (1984) acerca de la energía disipada por relámpagos en Titán es correcto, entonces la energía de un relámpago en Titán sería aproximadamente 10^3 veces menor que el valor típico para la Tierra pero con una frecuencia comparable o mayor (Desh y Kaiser, 1990).

Los resultados obtenidos hasta la fecha no niegan la posibilidad de encontrar, en las nubes de Titán, un tipo de descargas eléctricas diferente a los relámpagos. La presencia o ausencia de actividad eléctrica en el satélite tiene consecuencias importantes en el inventario de los hidrocarburos encontrados en su atmósfera. Por ejemplo, las abundancias observadas para el metanonitrilo, etino, etano y propano están en concordancia con las abundancias calculadas a partir de modelos fotoquímicos (Yung *et al.*, 1984). A pesar de esto, la predicción en base a estos modelos para el eteno queda un orden de magnitud por debajo de la abundancia observada y no puede ajustarse a menos que se considere la existencia de actividad eléctrica en Titán (Borucki *et al.*, 1984). Esto demuestra que en ausencia de relámpagos entonces algún otro proceso eléctrico debe estar involucrado. Desh y Kaiser (1990) proponen que las emisiones de tan baja energía y alta frecuencia que se encuentran en Titán y que no corresponden a emisiones de relámpagos, puedan ajustarse a los parámetros de algún otro tipo de actividad eléctrica. Es muy probable que los campos eléctricos originados en las nubes de Titán no sean lo suficientemente fuertes como para iniciar descargas de tipo relámpago pero bien puede suceder que esta energía se esté disipando mediante descargas de tipo corona (Navarro-González y Ramírez, 1997).

1. 7. 3. Plasmas de altas temperaturas

La Química de atmósferas planetarias inducida por procesos asociados a plasmas de altas temperaturas es de gran interés dado que estos procesos pueden explicar el origen de algunas de las especies químicas detectadas. Existen al menos dos fenómenos importantes que generan plasmas de altas temperaturas en las atmósferas planetarias: los relámpagos y la entrada de bólidos con alta velocidad a la atmósfera. En ambos casos el calentamiento súbito que sufren los gases atmosféricos conduce a la formación de un plasma de alta temperatura que emite radiación electromagnética con longitudes de onda correspondientes a la región del ultravioleta y produce ondas de choque que se propagan hacia la atmósfera circundante (Scattergood *et al.*, 1989). Estos procesos inician reacciones químicas que transforman a los gases simples en compuestos más complejos entre los que se encuentran productos en fase gaseosa y en fase sólida, estos últimos mejor conocidos como aerosoles. La energía disipada por la radiación, es una pequeña fracción

de la energía total producida, sin embargo las reacciones de fotólisis originadas por esta luz pueden jugar un papel muy importante en la síntesis de algunas de las moléculas detectadas en la atmósfera (Scattergood *et al.*, 1989; Yung *et al.*, 1984).

Debido a que la presencia de descargas eléctricas de tipo relámpago no ha sido detectada en la atmósfera de Titán, los fenómenos originados por los plasmas de altas temperaturas se concentran en la entrada de objetos a gran velocidad en la atmósfera y consecuentemente con las ondas de choque asociadas con estos. Este tipo de impactos pueden afectar la composición química atmosférica. Se cree, por ejemplo, que en las primeras etapas de la historia de Titán, la formación de nitrógeno molecular a partir de amoníaco por la ondas de choque generadas debido a la entrada de meteoritos, pudo haber sido un evento significativo (Jones y Lewis, 1987). Se ha demostrado además, que el impacto de material cometario ha contribuido con la constitución de la atmósfera aportando compuestos oxigenados como dióxido de carbono y agua (Zahnle, 1992; Griffith y Zahnle, 1995).

Para los planetas internos, el tipo de bólidos que entran a sus atmósferas consiste principalmente de fragmentos asteroidales, mientras que para los satélites de los planetas gigantes, entre los que se cuenta a Titán, estos objetos provienen en su mayoría de fragmentos cometarios y de los constituyentes del cinturón de Kuiper (Ivanov *et al.*, 1997). También puede ocurrir la entrada de material condrito-carbonaceo, objetos rocosos y objetos formados por fierro metálico (Chyba *et al.*, 1993). El ángulo de entrada y velocidad típicos para estos objetos es de 45° y 15 km s^{-1} (Engel *et al.*, 1995). La fuerza interna de cohesión determina la altura a la que los cuerpos se fragmentan. Los cuerpos de menor fuerza interna como los fragmentos cometarios, se fragmentan a alturas mayores que los cuerpos de fuerza interna superior a 10 bar como los materiales rocosos y metálicos. Estos últimos pueden por lo tanto, llegar a los niveles de la troposfera y más aún hasta la superficie. Son estos cuerpos voluminosos, de gran cohesión interna y de naturaleza rocosa o metálica los que ocasionan la formación de un plasma atmosférico de altas temperaturas en Titán (Engel *et al.*, 1995).

La continua desintegración del satélite Hiperion es un evento cósmico que probablemente mantiene una entrada constante de bólidos a altas velocidades a la atmósfera de Titán (Farinella *et al.*, 1983) ya que la órbita descrita por el satélite Hiperion esta en resonancia con la órbita de Titán y por lo tanto muchos de los fragmentos expulsados pueden precipitar hacia Titán en un tiempo relativamente corto y en un número considerable. Interpolando el número de impactos estimados para los satélites Iapetus y Rhea, vecinos de Titán, se ha calculado que este último

debe de tener huellas de impactos superiores a 20 km de diámetro producidas por la entrada de aproximadamente 200 cuerpos planetarios, distribuidos en superficies de 10^6 km^2 (Lorenz, 1997).

1. 8. Los aerosoles de Titán

La apariencia amarillo-naranja observada para la circunferencia de Titán es un indicativo de la presencia de aerosoles en su atmósfera. Los aerosoles se originan cuando los productos de disociación del metano y del nitrógeno molecular se recombinan para formar hidrocarburos y nitrilos pequeños que difunden hacia la estratosfera transformándose en compuestos de C-H-N más complejos. Estos compuestos inician la formación de las partículas de aerosoles formando esferas con un radio de aproximadamente $0.1 \mu\text{m}$ (Rages *et al.*, 1983). En su recorrido hacia la superficie encuentran zonas más frías en donde se condensan y quedan suspendidas. En las primeras etapas de su crecimiento, es muy fácil que las partículas choquen unas con otras y formen agregados de mayor tamaño siguiendo un crecimiento de tipo fractal. La mayor parte de estas partículas queda suspendida entre los 200-250 km de altitud formando la capa principal de aerosoles y por arriba de los 300 km de altitud formando la capa separada (Atreya, 1986; Morrison *et al.*, 1986). Las observaciones realizadas por las naves Viajero 1 y 2 en noviembre de 1980 y en agosto de 1981 demostraron la presencia de partículas desde altitudes de 500 km sobre la superficie y corroboraron la presencia de la capa principal y de la capa separada demostrando que ambas son opacas en las longitudes de onda de la región visible del espectro electromagnético (Rages y Pollack, 1983).

La detección de compuestos orgánicos en fase gaseosa realizada por la nave Viajero 1, confirmó la naturaleza orgánica de los aerosoles. El hecho de que algunas de las señales del espectro IRIS (Fig. 1) no puedan ser atribuidas a moléculas gaseosas indica que algunos de los compuestos orgánicos detectados deben de estar presentes en forma condensada. Khanna *et al.* (1987) han asignado la banda de absorción localizada a 478 cm^{-1} como correspondiente a dicianoacetileno sólido (C_4N_2) y Coustenis *et al.* (1999) han asignado algunas otras bandas del espectro IRIS como correspondientes a hielos de HCN, HC_3N , C_2H_2 , C_2H_6 y $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CN}$.

Los aerosoles participan de manera directa en la forma en que la radiación solar se absorbe y redistribuye en la atmósfera de Titán y por lo tanto tienen un efecto significativo en el perfil de temperatura y en el valor de la temperatura de la superficie. Las partículas de aerosoles reflejan el 30% y absorben el 40% de la radiación solar incidente, convirtiéndola en energía térmica atmosférica que transfieren a las moléculas de gas. El gradiente de temperatura, de algunos cientos de grados Kelvin (Samuelson, 1970), establecido entre las partículas y las moléculas de

gas promueve el inicio de movimientos de masas atmosféricas que equilibran los cambios de temperatura ocasionados principalmente por la pérdida de la energía térmica. La profundidad óptica de la atmósfera alta es muy pequeña en la región del infrarrojo, esto significa que la radiación térmica puede escapar fácilmente ocasionando el efecto anti-invernadero que enfría la superficie en 9 K. En cambio, en la troposfera los condensados de metano (nubes) y de hidrocarburos y nitrilos en general, actúan como una cubierta térmica ocasionando un aumento de temperatura de 20 K. El efecto neto en la superficie es un aumento de 11 K sobre el valor de la temperatura de equilibrio calculada en 83 K (McKay *et al.*, 1991). Además de los efectos de transferencia radiativa, el movimiento de traslación del satélite también participa en la redistribución de la energía solar. Diferencias de temperatura de 3-15 K entre el ecuador y el polo direccionado hacia el Sol han sido estimadas por Flasar *et al.* (1981) y Samuelson *et al.* (1997). El calor es transportado desde la troposfera a altas latitudes mediante corrientes de velocidad moderada que se inician en el ecuador. El gradiente de temperatura establecido ocasiona la acumulación de los hielos de algunos compuestos, especialmente nitrilos, en los polos. Como consecuencia del cambio de estación del satélite, la producción de algunos compuestos orgánicos parece ser más eficiente durante la primavera, cuando el satélite recibe una mayor cantidad de energía solar. La combinación de estos dos fenómenos ocasiona que uno de los hemisferios de Titán aparezca permanentemente más opaco que el otro. Durante la primavera del hemisferio norte, cuando la nave Viajero 1 observó a Titán, el hemisferio norte era el más opaco.

La mayoría de los modelos diseñados para explicar algún aspecto de la atmósfera de Titán como el aspecto del espectro de infrarrojo obtenido por la nave Viajero 1 (Samuelson y Mayo, 1991), detalles de la microfísica de la atmósfera (McKay *et al.*, 1989; Toon *et al.*, 1992), las propiedades físicas y químicas de los aerosoles (Rannou *et al.*, 1995; Tomasko *et al.*, 1997) o las características de la superficie (Coustenis *et al.*, 1995), hacen uso del albedo geométrico de Titán. El albedo geométrico de Titán (Fig. 7), es una medida de la reflectividad del satélite determinada por la forma en que la radiación solar interacciona con las partículas de los aerosoles y con las moléculas de los componentes gaseosos de la atmósfera, en función de la longitud de onda. En la región ultravioleta, los aerosoles absorben casi toda la radiación y las moléculas gaseosas difunden la fracción restante. En la región visible el albedo está determinado por los aerosoles que oscurecen la superficie. A longitudes de onda mayores las partículas de los aerosoles van perdiendo sus propiedades absorbentes y son las propiedades de la superficie las que dominan el patrón de reflectividad. Cerca de los 0.8 μm , la absorción de la radiación debida al metano gaseoso es predominante y la superficie es observable solamente a longitudes de onda específicas. Entre los parámetros utilizados para interpretar al albedo geométrico se encuentran

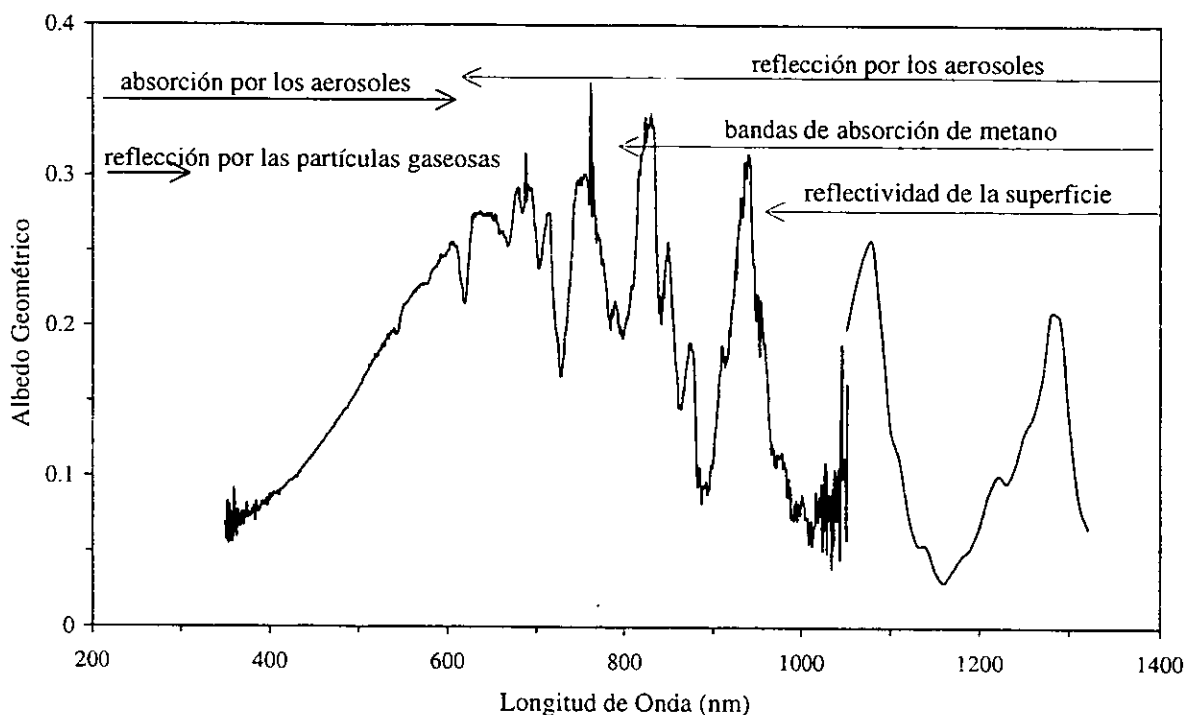


Figura 7. Albedo geométrico de Titán. Los valores corresponden a McGrath *et al.* (1998) de 200 a 300 nm; Neff *et al.* (1984) de 300 a 110 nm y Lemmon *et al.* (1995) de 1100 a 1300 nm. Las fechas indican los principales procesos atmosféricos que contribuyen con el aspecto del albedo geométrico en cada intervalo de longitud de onda.

los valores del índice de refracción complejo de los aerosoles. La referencia universalmente utilizada para este fin son los valores del índice de refracción complejo de los "tholins" producidos por Khare *et al.* (1984), el cual es el primer intento experimental especialmente diseñado para realizar la estimación de los parámetros del índice de refracción complejo. Sin embargo, los valores calculados requieren siempre de un factor multiplicativo de corrección para ajustar los valores del índice de refracción complejo a los valores reales del albedo. Este factor de corrección depende principalmente del intervalo de longitud de onda en que se realice el estudio y oscila por ejemplo entre 1.3 y 3 para longitudes de onda de entre 0.1 y 1 μm (McKay y Toon, 1992) y entre 0.3 a 0.5 para la región del infrarrojo (Courtin *et al.*, 1995).

1.9. Nubes y lluvia de metano en la troposfera de Titán

El metano es un componente importante de la atmósfera de Titán. Los cálculos más recientes indican que su fracción mol oscila entre 0.060 - 0.034 (Samuelson y Mayo, 1997) cerca de la superficie, aumenta hasta 0.10 en la tropopausa (Toon *et al.*, 1988) y nuevamente disminuye a

0.045 en la estratosfera (Coustenis y Bézard, 1995). Con esta cantidad de metano y las temperaturas de la troposfera (71 a 94 K, Tabla 1), se especulaba acerca de la condensación de metano y consecuentemente, sobre la existencia de nubes (Toon *et al.*, 1988).

La idea de que en Titán existen nubes de metano originalmente surgió cuando los investigadores encargados de analizar el espectro de infrarrojo de la atmósfera de Titán realizado por la nave Viajero 1 en 1980 (Fig. 3), se encontraron con una pérdida de transparencia de la atmósfera en la región de los 200-600 cm^{-1} . Para explicar este aumento de la opacidad y la tendencia general del espectro se requería que en la atmósfera se encontrara un absorbedor de la radiación solar. Hanel *et al.* (1981) y Samuelson *et al.* (1981), de manera independiente concluyen, basados en los coeficientes de absorción de metano disponibles en esa época (Savoie y Fournier, 1970), que el vapor de metano no explicaba la absorción observada a números de onda menores de 500 cm^{-1} y sugerían que otro absorbedor, como las nubes de metano, debía de dominar la región de los 200 cm^{-1} con una profundidad óptica cercana a 2. Las nubes de metano no eran difíciles de justificar considerando el alto contenido de metano detectado en la troposfera.

Toon *et al.* (1988) demostraron tiempo después, utilizando valores de los coeficientes de absorción de CH_4 y N_2 gaseosos obtenidos a bajas temperaturas, curvas de presión de vapor del metano y de presión-temperatura de la atmósfera de Titán, que estos gases podían explicar la opacidad observada en la atmósfera y que las nubes de metano actuaban como dispersores atmosféricos de la radiación infrarroja y no como absorbedores. No se descartaba su presencia pero se proponía que las nubes eran una consecuencia de la alta cantidad de metano calculada para la troposfera. Toon *et al.* (1988) proponen un valor de saturación de metano en la superficie de ~35% e imaginan que este gas se mezcla uniformemente sobre la superficie hasta llegar a una altura en la cual su presión parcial excede a su presión de vapor (base de la nube). A partir de ese momento la fracción mol de metano sigue la curva de presión de vapor, es decir su contenido aumenta con incrementos en la altitud. Esto corresponde con la formación del cuerpo de la nube, el cual puede extenderse desde los 5 hasta los 30 km. Finalmente se alcanza una altura en la cual la fracción mol permanece constante (cima de la nube). Las nubes de este modelo se proponen como entidades difusas y distribuidas en la troposfera del satélite entre los 10 y los 30 km de altitud con partículas de un tamaño de 50 a 3000 μm .

La prueba contundente acerca de la existencia de nubes de metano condensado en la troposfera de Titán, corresponde a las observaciones realizadas por Griffith *et al.* (1998) a través de las ventanas espectrales de la región del infrarrojo cercano. Los espectros de la atmósfera baja y de

la superficie de Titán registrados los días 4 y 5 de septiembre de 1995, a través de las ventanas espectrales correspondientes a 1.3, 1.6, 2.0 y 2.9 μm presentan niveles de reflectividad (albedos) inesperadamente altos: 14, 17, 30 y 200% respectivamente, para cada ventana. Estas observaciones constituyen un indicativo inequívoco de la presencia de algún tipo de perturbación de la atmósfera baja que se justifica perfectamente cuando el modelo de la atmósfera de Titán se complementa con nubes ópticamente opacas. Las nubes propuestas correlacionan muy bien las absorciones observadas tanto para las ventanas de longitudes de onda corta (1.3, 1.6 y 2.0 μm) como para la ventana de 2.9 μm . Esta última ventana había representado serios problemas de interpretación en trabajos anteriores (Toon *et al.*, 1988; Griffith *et al.*, 1991; Coustenis y Bézard, 1995). De esta manera queda demostrado que efectivamente hay nubes de metano condensado en Titán ubicadas entre los 15 ± 10 km de altitud, formadas por partículas con un tamaño $\geq 5 \mu\text{m}$ y que cubren del 7 al 9% de la totalidad del satélite. Las ventanas espectrales observadas son precisamente las que resultan afectadas cuando las nubes se sitúan a una altitud de 15 km. Nubes a altitudes mayores tendrían un impacto sobre regiones espectrales más amplias y nubes a altitudes menores tendrían un impacto sobre regiones espectrales mucho más reducidas.

La descomposición fotolítica del metano y consecuentemente la necesidad de una forma de reabastecimiento hacia la atmósfera es otro argumento que se ha utilizado para justificar la presencia de nubes de metano. Este gas es convertido irreversiblemente por acción de la radiación ultravioleta en otros hidrocarburos con una tasa del orden de $10^{-14} \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (McKay *et al.*, 1989). Esta transformación implica que sobre la superficie de Titán deben de encontrarse varios cientos de metros de sedimentos de los hidrocarburos producidos. Para contrarrestar esa pérdida de metano, se necesita una fuente de reabastecimiento ya que de otra manera el metano se agotará en un tiempo de 10^5 años (Toon *et al.*, 1988). La primera fuente de reabastecimiento propuesta fue un océano de etano uniformemente distribuido en la superficie en el que permanecieran disueltos el metano, el nitrógeno y otros hidrocarburos pequeños como el propano (Lunine *et al.*, 1983). Este océano permitiría tener condiciones de saturación favorables para el metano en la atmósfera baja y propiciaría las condiciones para la formación de nubes de metano puro a una determinada altitud. Sin embargo, las observaciones más recientes de Titán en las longitudes de onda del infrarrojo indican que las variaciones del albedo excluyen la presencia de un océano global debido sencillamente a que los hidrocarburos líquidos presentan valores de reflectividad muy bajos (< 0.020 , Coustenis y Bézard, 1995). De manera que la presencia de hidrocarburos líquidos en Titán se ha restringido a la existencia de pequeños lagos o mares aislados que cubran parcialmente a la superficie (Griffith *et al.*, 1991; Sagan y Dermott, 1982). Afortunadamente, puede considerarse que la razón de descomposición del metano es baja, lo cual

facilita que un flujo relativamente pequeño de metano hacia la atmósfera sea suficiente para evitar su pérdida total. Esta pequeña cantidad de metano requerida, puede ser proporcionada por el metano que se evapora a partir de los lagos o mares de la superficie. Otra forma de contribuir al reabastecimiento atmosférico del metano es mediante el degasamiento de los clatratos de la superficie (Owen, 1982).

Las nubes de metano en Titán pueden ser eventos breves y por lo tanto difíciles de detectar. La atmósfera de Titán más fría y densa, pero menos turbulenta que la terrestre, puede albergar nubes de metano que se disipen rápidamente. La baja densidad numérica de los núcleos de sedimentación (Tabla 3) provoca un crecimiento acelerado de las partículas que forman a la nube seguido casi inmediatamente de su precipitación y la desaparición de la nube. Los intentos por caracterizar a las nubes de Titán (extensión y tipo) no han sido muy contundentes, sin embargo, los mejores estudios indican que las nubes deben de ser difusas y cubrir una fracción reducida de la superficie del satélite (Griffith *et al.*, 1998).

Las propiedades de las nubes de metano de Titán se comparan en la Tabla 3 con las propiedades de las nubes terrestres. Las teorías y modelos actuales sugieren que las nubes existen desde los 5 hasta los 30 km (Toon *et al.*, 1988; Griffith *et al.*, 1998) y que están formadas por partículas de metano de unos 50 μm de radio. La concentración de estas partículas en la nube se calcula que es del orden de 10^{-3} cm^{-3} . La proporción entre la masa de la nube y la masa de vapor condensable es considerablemente menor a pesar de que existe aproximadamente 60 veces más vapor disponible en la atmósfera de Titán. Los aerosoles de la estratosfera son la principal fuente de núcleos de condensación para el metano, de ahí que las partículas que forman a las nubes sean de mayor tamaño y que su concentración sea menor si se comparan con las partículas de las nubes de la Tierra. La velocidad de producción de las partículas de nubes de Titán es de aproximadamente $3.8 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, la velocidad de fotólisis del metano. La cantidad de nubes que se forma, es dos órdenes de magnitud menor a la cantidad de nubes terrestres. Con estas características se considera que las nubes de Titán se parecen más a la lluvia terrestre que a las propias nubes.

En Titán, los núcleos de condensación, que pueden permanecer durante varios años en la estratosfera baja en concentraciones de aproximadamente 10 partículas por centímetro cúbico (Toon *et al.*, 1988), están presentes en una densidad menor con respecto a la Tierra. Los movimientos verticales de la atmósfera de Titán, ocasionan que las parcelas de aire con un contenido de metano cercano a la saturación, se supersaturen. Aún cuando la supersaturación total que se alcanza en la tropopausa es menor que la terrestre, el ascenso de un kilómetro es

Tabla 3. Comparación de las nubes de Titán con las nubes terrestres*

Propiedad	Titán	Tierra
Componente principal	CH ₄	H ₂ O
Estado físico de las partículas	Líquido	Líquido y hielo
Constante dieléctrica del líquido (ϵ)	1.7	80
Fuerzas intermoleculares	Van der Waals	Enlaces de hidrógeno
Tensión superficial del líquido ($N m^{-1}$)	0.017	0.070
Tamaño de las partículas (μm)	>50	10
Concentración de las partículas (cm^{-3})	< 10^3	100
Masa típica de la nube ($g cm^{-3}$)	> 4×10^{-9}	4×10^{-7}
Cantidad de vapor de saturación (cm^{-3})		
Superficie	1×10^{19}	4×10^{17}
Tropopausa	5×10^{17}	4×10^{14}
Nivel de supersaturación (% a 1 km de la superficie)	200	60
Gradiente de temperatura entre la superficie y la tropopausa (K)	23	58
Velocidad de la lluvia ($m s^{-1}$)**	1.6	10
Estado físico de la lluvia antes de llegar a la superficie	Evaporación	Permanencia líquida

*Navarro-González y Ramírez, 1997; ** El tamaño máximo de la gota es de 9.5 mm y de 6.5 mm para la Tierra y Titán respectivamente (Lorenz, 1993).

suficiente para tener un nivel de supersaturación considerable (Tabla 3). El vapor de metano comienza a condensarse sobre los núcleos disponibles; sin embargo, en este caso la menor cantidad de núcleos de condensación disponibles va a provocar que el nivel de supersaturación no disminuya aún cuando las partículas alcancen un tamaño de 100 μm . Por lo tanto las partículas siguen creciendo hasta el orden de los milímetros que es cuando la masa condensada puede finalmente fijar el nivel de supersaturación en un valor del 10%. Para lograr la formación de una gota de lluvia en Titán con un tamaño de algunos milímetros, en un medio con una densidad de 2×10^{18} moléculas de metano disponibles por centímetro cúbico y una supersaturación cercana a la unidad, se necesita de aproximadamente una hora (Toon *et al.*, 1988). Durante ese tiempo la gota habrá viajado cerca de 10 km hacia la superficie para encontrarse en la zona de movimientos verticales y si tiene suerte atravesar esta región y llegar a la superficie.

La formación de las nubes de metano y consecuentemente la existencia de lluvia, pueden originarse por la interacción de los vientos locales con la topografía propia del satélite (Flasar *et al.*, 1981), lo que ocasionaría la formación de nubes orográficas. Las elevaciones topográficas propuestas podrían ser del orden de 1 km de altura. Un segundo mecanismo consiste en la inestabilidad térmica de las capas de la atmósfera baja originada por las corrientes convectivas (Awal y Lunine, 1994). La cantidad de metano esperada para esa región es suficiente para permitir la formación de nubes. Otra propuesta consiste en la convección iniciada por la diferencia latitudinal de la humedad relativa de metano. La existencia de este gradiente, aunque consistente con el espectro IRIS, podría iniciar movimientos convectivos, pero no sería suficiente para mantenerlos (Awal y Lunine, 1994) por lo tanto se originarían nubes con un tiempo de vida muy breve.

Considerando una fracción mol de metano de 3-7% cerca de la superficie y un mecanismo iniciador de corrientes convectivas por inestabilidad térmica, Awal y Lunine (1994) calculan que la velocidad de las corrientes convectivas de Titán es de 1 a 13 m s⁻¹, de manera que es éste el mecanismo más importante para mover el metano de la superficie a la troposfera alta. El tiempo de reabastecimiento de metano es de 10²-10³ años lo que indica que es significativamente más rápido que su tiempo de destrucción fotolítica, estimado en 10⁷ años por Yung *et al.* (1984).

Las gotas de lluvia de metano en Titán se fragmentan cuando alcanzan tamaños cercanos a los 3 milímetros debido a la baja tensión superficial del metano. La velocidad de descenso de las gotas más grandes es de 1.6 m s⁻¹ (Lorenz, 1993) y es considerablemente menor que la velocidad de descenso de las gotas de lluvia terrestre. El descenso y la evaporación de las gotas de lluvia de metano cerca de la superficie de Titán son descritos en el modelo desarrollado por Lorenz (1993), en el cual tomando en cuenta el tamaño de las gotas, su estructura física, su velocidad de descenso y la tasa de evaporación, demuestra que hay una capa dinámica de nubes a altitudes de entre 3 y 30 km debajo de la cual se pueden encontrar a los aerosoles que funcionaron como núcleos de condensación y gotas de lluvia. Los aerosoles forman una bruma muy cerca de la superficie, una vez que la mayor parte de las gotas de lluvia se ha evaporado. Esta evaporación es más lenta en las regiones frías y húmedas de Titán como los polos, en donde las gotas tienen la posibilidad de llegar hasta la superficie y se cree que forman casquetes polares (Stevenson y Potter, 1986). El lugar más indicado para que la lluvia alcance la superficie son las elevaciones de tipo montañoso ya que las gotas recorrerían una distancia menor para llegar a la superficie y las temperaturas de estas regiones serían más bajas que en las regiones ecuatoriales. Las gotas de lluvia aumentan sus probabilidades de llegar a la superficie como tales, si la humedad relativa de

la atmósfera es mayor, como puede observarse en la Fig. 8. Para valores de humedad relativa menores al 70%, los cuales corresponden al límite máximo de acuerdo con la información colectada por la nave Viajero 1 (Flasar, 1983) las gotas se evaporan completamente antes de alcanzar la superficie. El modelo de Lorenz (1993) indica que las gotas con un radio de 4.5 mm que inician su descenso hacia la superficie y que encuentran una elevación de 1 km de altura, llegan a este nivel con un tamaño de aproximadamente 2 mm. Si estas mismas gotas tuvieran que viajar hasta encontrar una elevación de 500 metros, su tamaño se reduciría a la mitad. La presencia de nubes cerca de la superficie aumenta las posibilidades de que las gotas alcancen este nivel, aún con niveles de humedad relativa pequeños. En este caso la ventaja es la corta distancia que tendrían que recorrer.

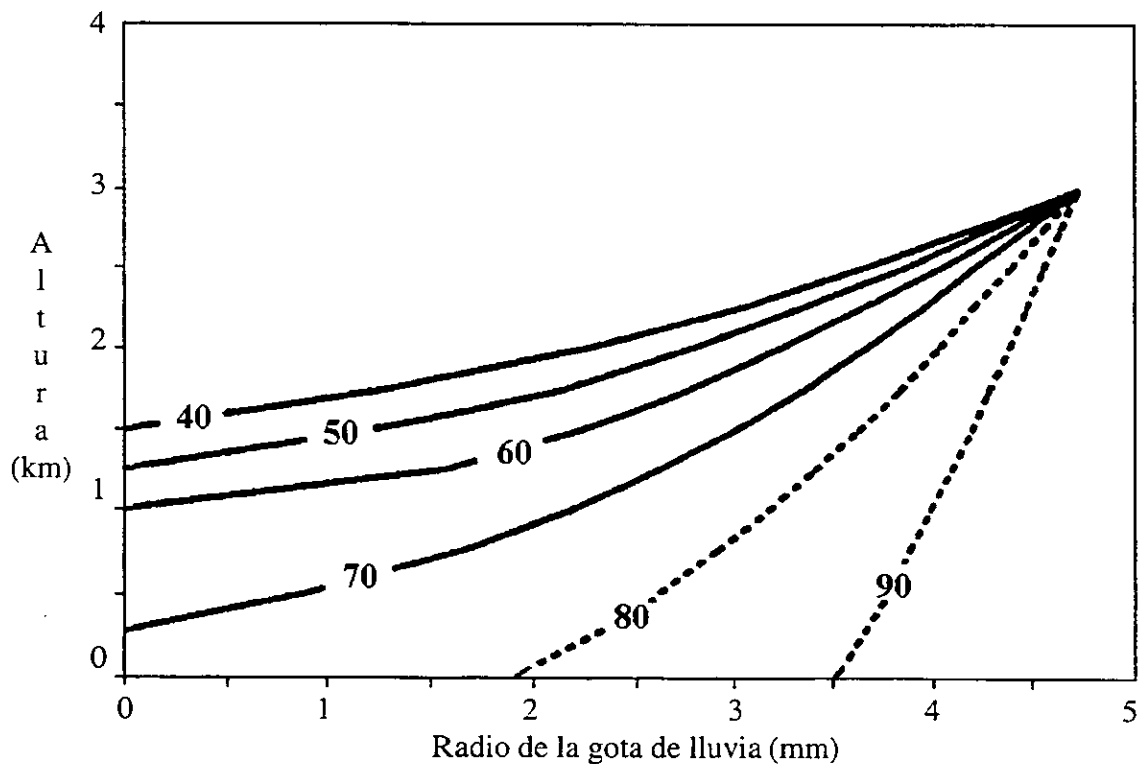


Figura 8. Evaporación de las gotas de lluvia de metano en Titán. Para valores de humedad relativa menores al 70% (límite máximo según la información colectada por la nave Viajero 1, (Flasar, 1983) las gotas se evaporan completamente antes de llegar a la superficie (Lorenz, 1993).

Considerando que las gotas de lluvia llegan a la superficie antes de evaporarse, hay que analizar lo que sucede con ellas. Lorenz (1993) considera que si una parte de la superficie de Titán es líquida, como podría ser el caso si consiste de lagos o mares de metano-etano, las gotas que estarían sedimentando se integrarían a estos lagos o mares enriqueciéndolos con metano. Al aumentar la concentración de metano, tenderían a liberarlo hacia la atmósfera por evaporación. Por otro lado, si las gotas de lluvia encuentran una superficie porosa, que podría ser el caso si esta se encuentra cubierta por residuos de impactos exteriores, entonces las gotas serían absorbidas al percolarse hacia una sub-superficie sólida. En este caso la evaporación del metano hacia la atmósfera disminuiría considerablemente debido a que la cantidad de líquido expuesta sería mucho menor que en el caso anterior. La presencia, entre los residuos que conformarían a la superficie, de materiales no volátiles solubles en metano reducirían aún más las posibilidades de evaporación del metano dejándolo atrapado entre la sub-superficie. Este tipo de hielos sucios son los que se proponen como el material que cubre a la mayor parte de la superficie de Titán (Griffith *et al.*, 1991) observándose como zonas oscuras en el espectro de infrarrojo cercano. El último escenario considerado por Lorenz (1993) corresponde a gotas de lluvia de metano que caen sobre una superficie lisa e impermeable. En este caso lo más probable es esperar la evaporación de estas gotas de lluvia ya que debido a la baja tensión superficial del metano (Tabla 3) las gotas pueden extenderse sobre una superficie mucho mayor que las gotas de agua presentando un área de evaporación mucho más grande facilitando la evaporación.

1. 10. Evolución de la atmósfera de Titán

El panorama cualitativo de los procesos que actualmente ocurren en la atmósfera de Titán se inicia en la estratosfera, en donde el metano y el nitrógeno gaseosos son transformados, por la radiación ultravioleta y el bombardeo de partículas energéticas, en iones y radicales que se recombinan para producir hidrocarburos superiores y nitrilos. Los productos principales como los hidrocarburos C_2 y C_3 y los nitrilos como el HCN y el C_2N_2 , forman agregados que evolucionan para producir a las partículas de los aerosoles que envuelven a Titán y que eventualmente precipitan hacia la superficie formando residuos líquidos o sólidos. Algunos de estos compuestos pueden quedar atrapados en la trampa fría de la tropopausa y actuar como núcleos de condensación del metano originando nubes entre las que puede postularse el desarrollo de descargas eléctricas. Otros eventos como la entrada de bólidos a altas velocidades, de material cometario y la continua incidencia de radiación cósmica, contribuyen también a la transformación de la atmósfera del satélite. La superficie de Titán es necesariamente el destino final de las moléculas orgánicas sintetizadas en la atmósfera. La dinámica de la atmósfera de Titán y su estabilidad están íntimamente relacionadas con la continua transformación del metano

gaseoso. Los modelos fotoquímicos indican que esta molécula desaparecerá totalmente de la atmósfera dentro de 10^7 - 10^8 años. La falta de evidencia respecto a la existencia de una reserva de metano líquido que sirva como fuente abastecedora y como depósito de los principales hidrocarburos y nitrilos producidos, conduce a considerar la posibilidad de que el satélite oscila entre períodos de atmósfera delgada y de atmósfera densa que corresponderían a períodos de eliminación paulatina y reabastecimiento súbito de metano, esto último como consecuencia de impactos cometarios o algún tipo de crio-vulcanismo (Lorenz, 1997).

El siguiente gran cambio esperado para la atmósfera de Titán esta relacionado con el aumento de la luminosidad del Sol. Lorenz *et al.* (1997) han calculado que dentro de unos 6 billones de años, cuando el Sol se encuentre en fase de gigante roja y la Tierra haya perdido toda su agua líquida y quizá también su atmósfera, la temperatura en la superficie de Titán habrá alcanzado el punto eutéctico de la mezcla amoniaco-agua (176 K) y tendrá posibilidades de mantener temperaturas de 200 K durante varios cientos de millones de años. Durante este tiempo y bajo estas condiciones Titán tendrá tal vez, la posibilidad de originar y mantener una biota modesta que evolucionaría hasta que el viento solar de la gigante roja erosione a toda la atmósfera.

Existen aún muchas preguntas acerca del origen, composición y evolución de la atmósfera de Titán que requieren información más clara y precisa. Algunas de las respuestas dependen de la optimización de las simulaciones experimentales del ambiente de Titán, otras requieren del mejoramiento de las técnicas de observación y modelización existentes y la gran mayoría vendrán cuando la misión Cassini-Huygens explore a Titán y al sistema de Saturno en el 2004.

2. OBJETIVOS

Un buen experimento de simulación reproduce lo más fielmente posible las condiciones reales del fenómeno que esté imitando. La simulación de los procesos que ocurren en una atmósfera planetaria involucra la comprensión y el dominio de diferentes parámetros como su composición, sus perfiles de presión y temperatura, las formas de energía disponibles para promover su transformación, la diferencia de fases entre sus constituyentes, etc. El presente trabajo tiene como principal objetivo el estudio de dos aspectos particulares de la atmósfera de Titán: la transformación de la troposfera debido a la acción de diferentes formas de energía que reproducen el efecto de descargas eléctricas, el impacto de bólidos acelerados y la incidencia de radiación cósmica, y el cálculo del índice de refracción complejo de un material análogo a los aerosoles estratosféricos.

Los resultados de los experimentos de simulación realizados entre los diferentes laboratorios que han estudiado la transformación de la atmósfera de Titán por alguna fuente de energía son en su mayoría cualitativos. Los pocos resultados cuantitativos han sido realizados en condiciones que no corresponden a la realidad de la atmósfera del satélite. Este es el principal obstáculo para derivar conclusiones acerca del inventario general de los compuestos químicos existentes en Titán. La primera parte del presente trabajo, consiste precisamente en realizar un estudio comparativo, en términos de rendimientos calculados en función de la energía, de la transformación química de la atmósfera baja de Titán en presencia de partículas gamma que simulan la acción de la radiación cósmica, un plasma iniciado por un haz láser que reproduce la entrada a la atmósfera de objetos con alta velocidad y su consecuente onda de choque, y descargas eléctricas de tipo corona y de arco cuya existencia puede esperarse entre las postuladas nubes de metano troposféricas. Debido a que las descargas de tipo arco desarrollan una química semejante a las descargas eléctricas de tipo relámpago y que estas últimas no han sido detectadas en Titán, se da especial énfasis a los fenómenos desarrollados por las descargas de tipo corona, analizando la dependencia en la formación de compuestos orgánicos en función de la polaridad.

El estudio comparativo presentado constituye el primer esfuerzo realizado en un solo laboratorio, utilizando las mismas técnicas e instrumental analítico, para la obtención de los rendimientos en función de la energía de cada uno de los compuestos sintetizados por las diferentes formas de energía; bajo este principio, el margen de error experimental se ve considerablemente disminuido. Otro gran avance lo constituye la adecuada estimación de la energía disipada por cada una de las fuentes de energía utilizadas. Utilizar fuentes de energía cuya presencia ha sido corroborada en la atmósfera del satélite complementa enormemente el trabajo de simulación y utilizar técnicas de análisis altamente especializadas, automatizadas e independientes pero al mismo tiempo complementarias realzan sin duda la aplicabilidad de los resultados.

Los objetivos particulares que se derivan del estudio de la transformación de la atmósfera de Titán comprenden

- Realizar la irradiación de una atmósfera simulada de Titán con descargas corona de polaridad positiva y negativa, descargas de arco, un plasma iniciado por un haz láser y fotones gamma.
- Identificar la naturaleza química de los productos formados por las diferentes fuentes de energía utilizando las técnicas acopladas de cromatografía de gases, espectrometría de masas y espectrofotometría de infrarrojo (TF).
- Estimar la cantidad de energía disipada por cada una de las fuentes en función del tiempo de irradiación.
- Calcular el rendimiento energético de los diferentes productos sintetizados en fase gaseosa con cada una de las fuentes de energía.

En lo que respecta al cálculo del índice de refracción complejo de los aerosoles de Titán, la única referencia existente data de hace 16 años (Khare *et al.*, 1984). Esos valores del índice de refracción, son el resultado de un ajuste matemático aplicado a algunos resultados experimentales. El material sintetizado y propuesto como un representante de los aerosoles de la estratosfera de Titán, es el producto de varios días de irradiación de una mezcla gaseosa que no corresponde con el contenido de metano de la parte alta de la atmósfera. Debido a la importancia del índice de refracción complejo en la interpretación de la información de la atmósfera del satélite y considerando sobre todo que los valores actuales hacen uso siempre de un factor de corrección antes de ser utilizados, el principal interés es realizar la síntesis de un material que represente de manera efectiva a los aerosoles estratósfericos de Titán utilizando condiciones

experimentales bien controladas, para estar en condiciones de determinar los valores de los parámetros del índice de refracción complejo a partir de sus constantes ópticas y bajo una caracterización cuidadosa del material obtenido.

Los objetivos particulares que se derivan del cálculo del índice de refracción complejo son:

- Sintetizar análogos apropiados de los aerosoles presentes en la estratosfera de Titán bajo condiciones experimentales bien controladas.
- Obtener muestras ópticamente adecuadas para la determinación de los espectros de transmitancia y reflectancia, en el intervalo de 200 a 900 nm, de los análogos sintetizados.
- Calcular el valor de los parámetros del índice de refracción complejo (n y k) a partir de las variaciones de transmitancia y reflectancia.
- Estudiar el efecto de parámetros intrínsecos de los análogos como porosidad, grosor de la muestra y fracción de luz reflejada, en el valor final del índice de refracción complejo.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La transformación química de la troposfera de Titán se inicia con los cambios originados por las descargas corona que pueden desarrollarse entre las nubes de metano. El plasma generado por este tipo de descargas eléctricas se caracteriza por que la temperatura de las entidades reactivas, los electrones, es siempre mayor por algunos cientos de grados Kelvin, respecto a la temperatura del gas, la cual corresponde generalmente a la temperatura ambiente. Esta es la principal característica de los plasmas fríos. El uso de fuentes energéticas que originan a este tipo de plasmas es una buena analogía de la química desarrollada en atmósferas planetarias ya que en ambos casos, los gases reactivos no son térmicamente excitados por la radiación y son los electrones los que inician la transformación de los constituyentes atmosféricos.

Posteriormente, se hace una distinción entre los productos originados por las descargas corona y los producidos por descargas de arco, la onda de choque originada en el plasma iniciado por un haz láser y los eventos de ionización generados por la radiación cósmica. Las descargas de arco y la onda de choque se conocen como plasmas de alta temperatura. Los procesos fundamentales de la química que desarrollan son diferentes a los originados por los plasmas fríos.

El trabajo continua con la determinación de las constantes ópticas de un material análogo a los aerosoles que forman las capas de brumas de la estratosfera de Titán, en un esfuerzo por complementar la caracterización fisico-química de este material. Debido a las limitaciones que actualmente existen para obtener muestras de los aerosoles estratosféricos o para realizar un análisis *in situ*, los experimentos de simulación son la mejor forma de contribuir al entendimiento que actualmente se tiene de ellos.

3. 1. Preparación de la troposfera simulada de Titán

El metano y nitrógeno utilizados en la preparación de la atmósfera simulada de Titán son gases con un alto grado de pureza, 99.97% y 99.999%, respectivamente (Linde, México). La composición de la mezcla que simula a la troposfera de Titán es de 10% de metano con balance

de nitrógeno. La preparación de la troposfera simulada se realizó en un sistema de mezclado, control y medición de flujo másico de ocho canales de Linde (FM-4660) esquematizado en la Fig. 9. Este sistema cuenta con un medidor de vacío Combitrón (CM-351) que opera en el intervalo de 7.5×10^{-3} a 1000 mbar. Está equipado también con un medidor de temperatura digital Omega (DP-80) el cual tiene una precisión de 0.1°C y una exactitud de $\pm 0.2^\circ\text{C}$.

La entrada de los gases al sistema de preparación de la mezcla simuladora de la troposfera de Titán se logra por medio de tuberías de acero inoxidable que parten de los cilindros contenedores de los gases. Cada uno de los cilindros cuenta con un regulador de presión de dos etapas, un filtro para partículas de hasta $2 \mu\text{m}$ y una válvula de control de presión manual. El flujo de gas

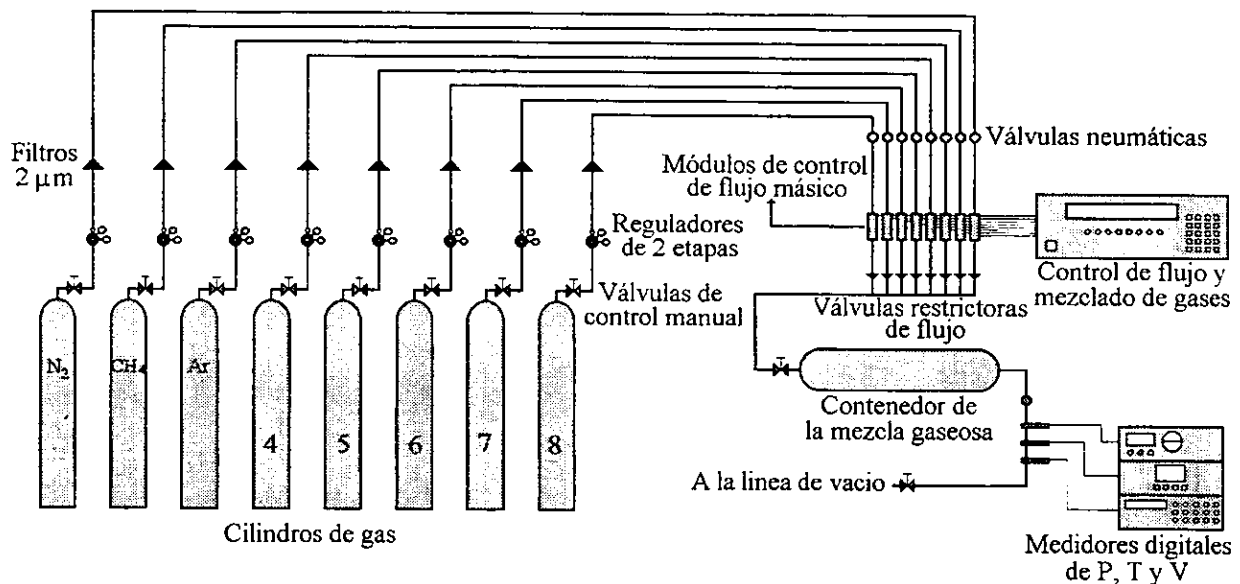


Figura 9. Representación esquemática de los sistemas utilizados en la preparación de la mezcla gaseosa simuladora de la troposfera de Titán.

de estos cilindros pasa a través de una válvula neumática al módulo de control de flujo másico. Cada canal cuenta con uno de estos módulos, los cuales están calibrados para trabajar con un flujo de entrada de 60 psi ($\text{pulgada}^2 \text{ libra}^{-1}$) y una velocidad máxima de salida de $20 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ y mínima de $2 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$. El flujo de gas sigue su camino hacia una válvula restrictora de flujo de un sentido que asegura que el gas que fluye no pueda regresar sobre la línea y contamine al sistema. Los ocho canales se unen en una tubería común la cual se conecta a un contenedor

metálico cilíndrico (bala) con capacidad de cuatro litros. La presión de este contenedor se monitorea con un medidor de presión Omega (DP-350) y la salida de los gases se controla con una válvula neumática.

La salida de la bala está conectada mediante tubería de acero inoxidable a una línea de vacío manufacturada con vidrio Pyrex que se ilustra en la Fig. 10. Sobre la tubería de acero inoxidable se ubican después de la válvula neumática, un transductor de presión, dos válvulas de flujo milimétrico manuales Nupro (SS-4BMG y SS-4BMRG) que permiten controlar el flujo de salida de la mezcla

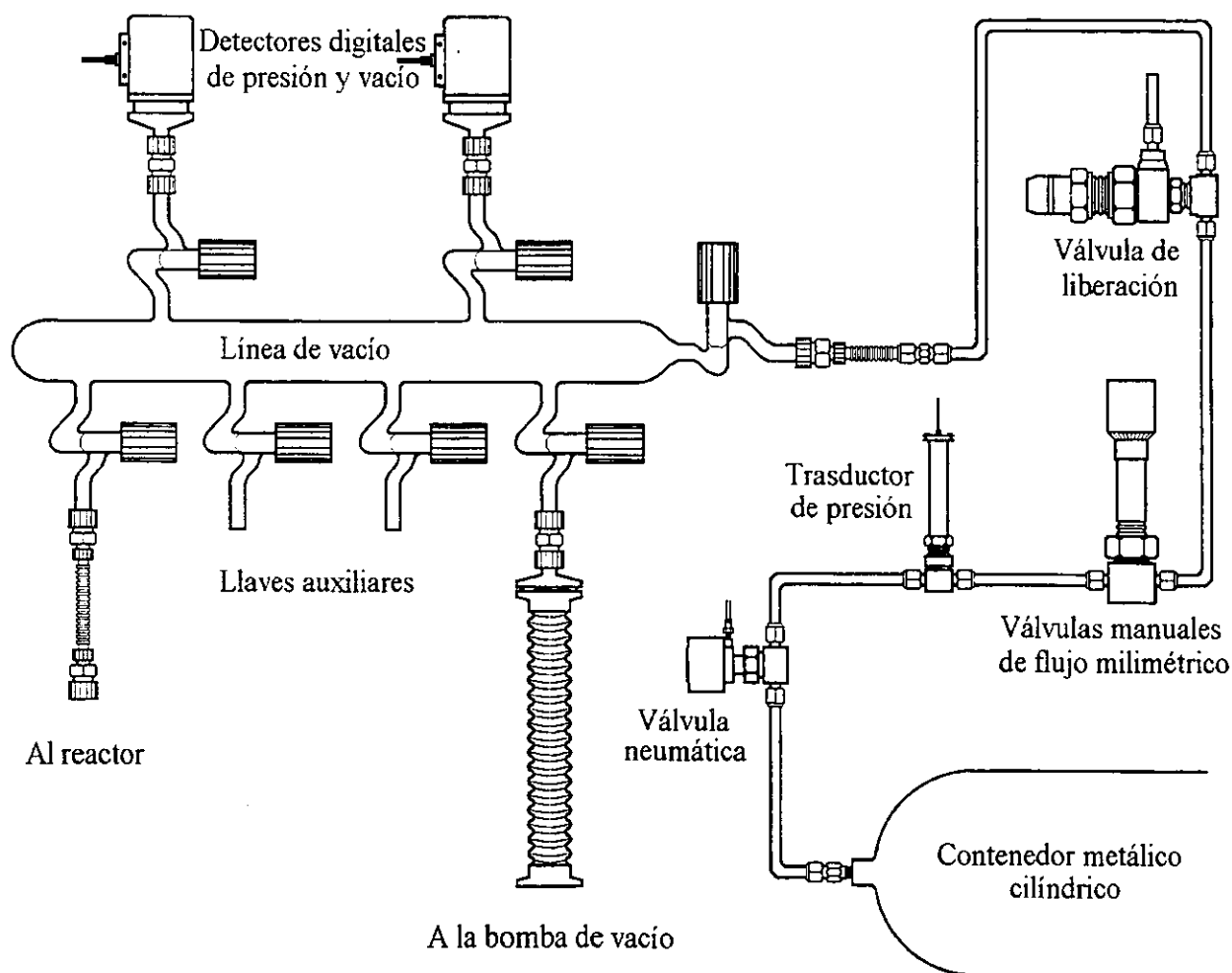


Figura 10. Representación esquemática de la línea de vacío utilizada para el llenado de los reactores con la mezcla gaseosa simuladora de la troposfera de Titán.

gaseosa hacia la línea de vacío y una válvula de liberación que en caso de una emergencia sirve para cerrar todas las válvulas neumáticas y detener el flujo de los gases. Esta válvula evita además que la presión en la línea de vacío aumente a más de 1200 mbar. Sobre la línea principal de vacío se ubican llaves de alto vacío que permiten el llenado y la evacuación del reactor ya que la línea se encuentra conectada, a través de una manguera metálica flexible, a una bomba de vacío de paletas rotatorias DUO (008B, Balzers Vaccum Components).

La bomba tiene una velocidad nominal de flujo de vacío de $11.1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ y alcanza una presión de vacío de 1.0×10^{-3} mbar. El control de la presión de alimentación y de vacío de la línea se realiza con detectores digitales. Uno es un detector Leybold TR-301 (DN 16KF mod. 15740) con filamento de tungsteno que detecta presiones desde 1.0×10^{-4} mbar hasta 15 mbar. El otro es un medidor de alta presión Leybold DI-2000 (mod. 15813) que detecta desde 5 mbar hasta 1200 mbar. Ambos detectores tienen una reproducibilidad de 0.1%.

Se ha propuesto que las nubes de metano en Titán se ubican entre los 5 km y los 25 km de altitud (Griffith *et al.*, 1998). En esta región la presión varía de 380 mbar a 1140 mbar y la temperatura desde 76 K hasta 86 K (Lunine, 1993). Tratando de reproducir estas condiciones, las irradiaciones se realizaron con 670 mbar de la troposfera simulada de Titán. Esta presión corresponde a una altura de 15 km y a una temperatura de 84 K. En este nivel la presencia de nubes es muy probable. Por este motivo es en esta región en donde se espera que se estén desarrollando descargas eléctricas de tipo corona intra e internube y hacia la superficie del satélite.

3. 1. 2. Preparación de la estratosfera de Titán

Los diferentes niveles de la atmósfera de Titán difieren en la cantidad de metano que contienen. La atmósfera baja es más rica en metano debido a que las menores temperaturas registradas en esos niveles (Tabla 1) favorecen su acumulación. En los niveles superiores, el aumento de la temperatura y la disminución de la fuerza de gravedad colaboran para que la fracción de metano disminuya. La fracción mol de metano en la estratosfera de Titán se encuentra entre 1.7 - 3.4 % (Lellouch *et al.*, 1989; Kouvaris y Flasar, 1991; (Strobel *et al.*, 1993). En el presente estudio, la síntesis de los análogos de los aerosoles de la estratosfera de Titán se realizó utilizando una mezcla certificada comercial de 2% de metano en nitrógeno grado 4.5 (Linde, Francia) contenida en un cilindro metálico de 10 litros de capacidad. La válvula de salida del cilindro esta conectada a una válvula de control de presión manual y a un regulador de presión de dos etapas especial para gases no inflamables (FMD 400). La mezcla gaseosa fluye hacia la entrada del reactor a través

de una tubería de acero inoxidable. Una bomba de paletas rotatorias (2004A Alcatel, Bélgica) de 0.37 kW de potencia, permite el tránsito de la mezcla gaseosa por el interior del reactor a una presión de 1 mbar. El flujo es controlado por una válvula manual de aguja y un detector de presión (917 Pirani HPS Division, USA) que opera en el intervalo de 0.001 a 100 mbar. Los extremos de entrada y salida del reactor se conectan al tanque que contiene la mezcla gaseosa y a la bomba de vacío mediante mangueras metálicas flexibles.

3. 2. Diseño de los reactores utilizados

Debido a las diferentes formas de energía utilizadas durante el desarrollo del presente trabajo de investigación, la exposición de la troposfera simulada se realizó utilizando reactores especiales, cada uno adecuado al tipo de fuente energética y a la cualificación de la potencia disipada durante el tiempo de irradiación. Se utilizaron cinco diferentes reactores, cuatro de ellos para simular los procesos en fase gaseosa iniciados en la troposfera de Titán por las descargas corona, de arco, el plasma originado por la entrada de un bólido a alta velocidad y la radiación cósmica. El quinto, utilizado en la síntesis de los análogos de los aerosoles de la estratosfera de Titán. Cada uno de estos reactores se describen a continuación.

3. 2. 1. Reactor de las descargas corona

El reactor utilizado en la irradiación con descargas corona se esquematiza en la Fig. 11 y se refiere en lo sucesivo como reactor I. El reactor I consta de un tubo de vidrio Pyrex (75 mm de diámetro interno \times 100 mm de altura) con capacidad de 0.47 litros. El electrodo interno es una varilla de tungsteno (1 \times 120 mm) soldada en el centro del reactor mediante una combinación de vidrio y uranita. El electrodo se conecta a un generador de corriente directa (CD) de alta potencia. En el interior del cuerpo del reactor se localiza una placa de acero inoxidable (200 \times 80 mm y 2 mm de grosor) que se conecta mediante un pequeño electrodo de tungsteno (30 mm) a un alambre de cobre que va a tierra. El reactor I cuenta con una llave de teflón en uno de sus extremos para facilitar su conexión a la línea de vacío o a la plataforma de análisis.

3. 2. 2. Reactor de las descargas de arco

Otro de los reactores utilizados fue especialmente diseñado para medir por calorimetría la cantidad de potencia (P) que disipan las descargas de tipo arco. La representación esquemática de este calorímetro, referido como reactor II, se ilustra en la Fig. 12. El reactor II esta formado por dos cilindros de vidrio Pyrex. El cilindro interno (70 mm de diámetro interno \times 254 mm \times 2.5 mm de espesor) tiene un volumen de 0.88 litros y se encuentra unido al cilindro externo (100

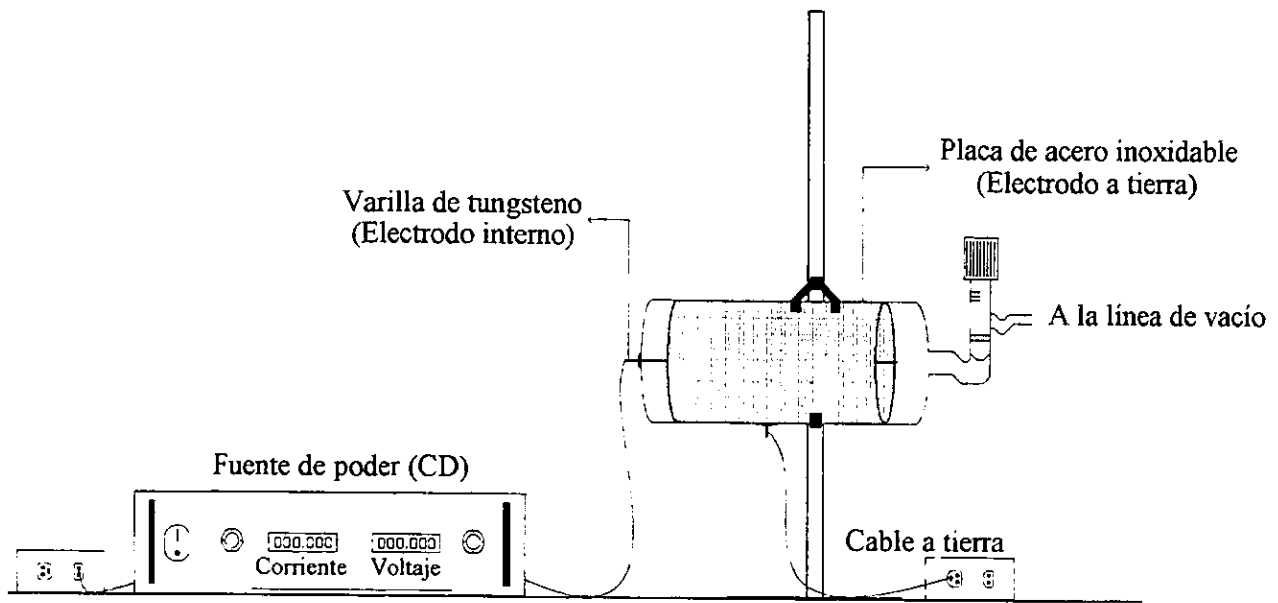


Figura 11. Esquema del arreglo experimental del reactor I utilizado en la simulación de los procesos corona en la troposfera de Titán.

mm de diámetro externo \times 284 mm \times 2.5 mm de espesor) mediante una cámara de vacío. Dos electrodos de tungsteno (1.0 mm \times 120 mm) móviles se introducen al reactor a través de dos extensiones laterales de vidrio Pyrex. En el interior del reactor, las puntas de los electrodos se mantienen con una separación de 10 mm. En el exterior del reactor, la unión entre cada una de las extensiones y una pequeña estructura de vidrio que sostiene a cada uno de los electrodos, es sellada mediante empaques circulares de FETFE y mediante unas pinzas de presión sujetadoras. Por la parte superior del reactor puede introducirse una resistencia de nicromel (HAI-Ni Cr 80, 0.2032 mm de diámetro, $33.9239 \Omega \text{ m}^{-1}$) soldada a dos electrodos de tungsteno mediante una aleación de plata. La resistencia tiene un valor de $84 (\pm 2\%) \Omega$. Este segundo par de electrodos están igualmente unidos al reactor mediante un empaque circular de FETFE y pinzas de presión sujetadoras. En el centro interno del reactor puede colocarse una sonda de temperatura o termopar (cobre-constantano) que se introduce mediante un conector rápido de teflón, sellado con un empaque circular adecuado para alto vacío, perpendicularmente localizado con respecto a los electrodos de tungsteno. La sonda de temperatura se conecta eléctricamente al panel de medidores digitales ilustrado en la Fig. 9 y la ventana indicadora correspondiente reporta el

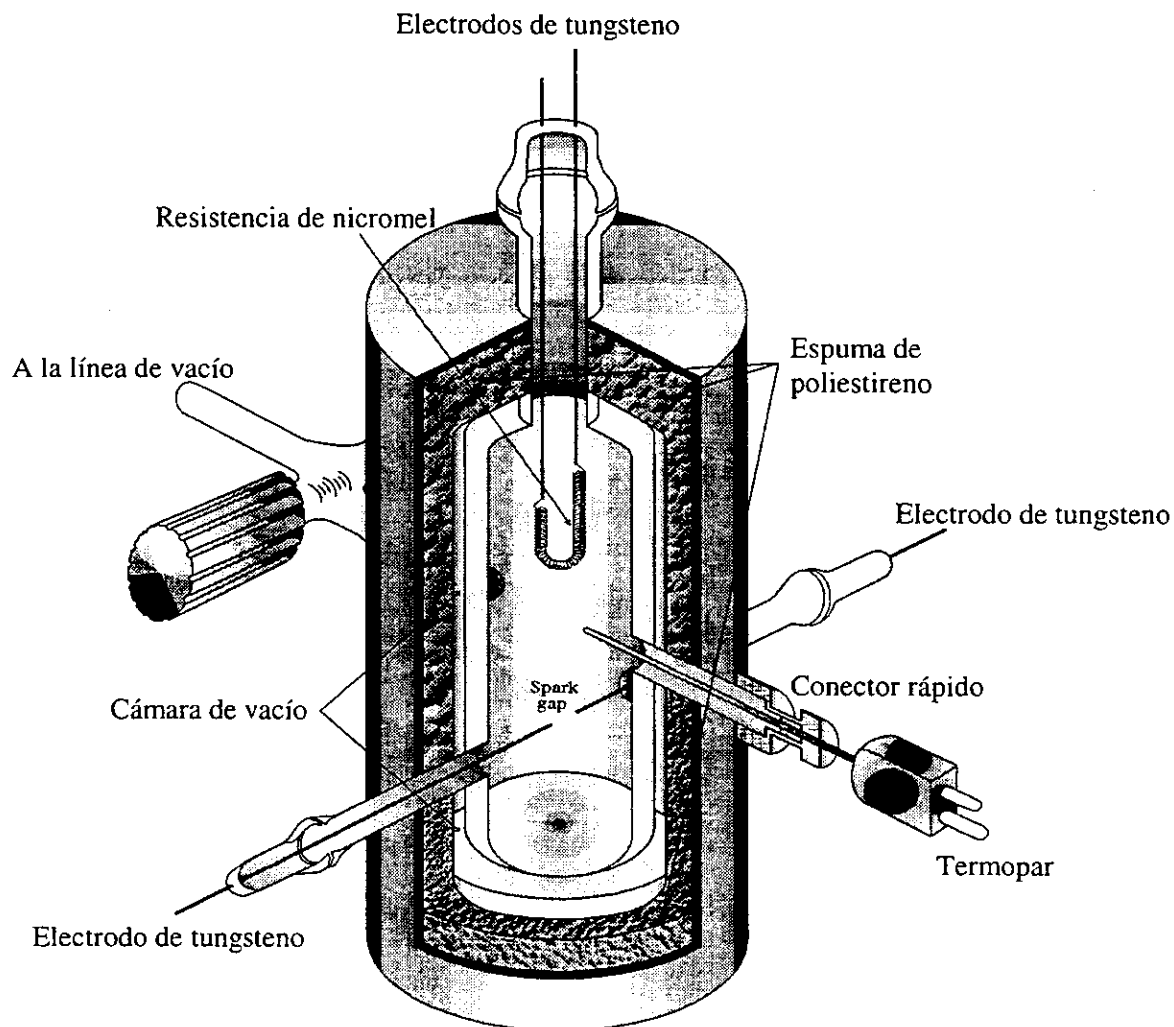


Figura 12. Reactor II o calorímetro utilizado para la generación de las descargas de arco y para la determinación de la potencia disipada.

valor de la temperatura interna del reactor. Opuesta a la entrada de la sonda de temperatura se localiza una llave de teflón que facilita la conexión del reactor hacia la línea de vacío o hacia el sistema de análisis utilizando una manguera flexible de acero inoxidable. El reactor II se aísla térmicamente del entorno ambiental con una cubierta de espuma de poliestireno ($1.3 \times 10^{-2} \text{ g cm}^{-3}$) de aproximadamente 20 mm de espesor y con una cubierta de policloruro de vinilo (PVC) de aproximadamente 4 mm de espesor. Los componentes que permanecen fuera de la cubierta de PVC son aislados con fibra de vidrio Pyrex y con una

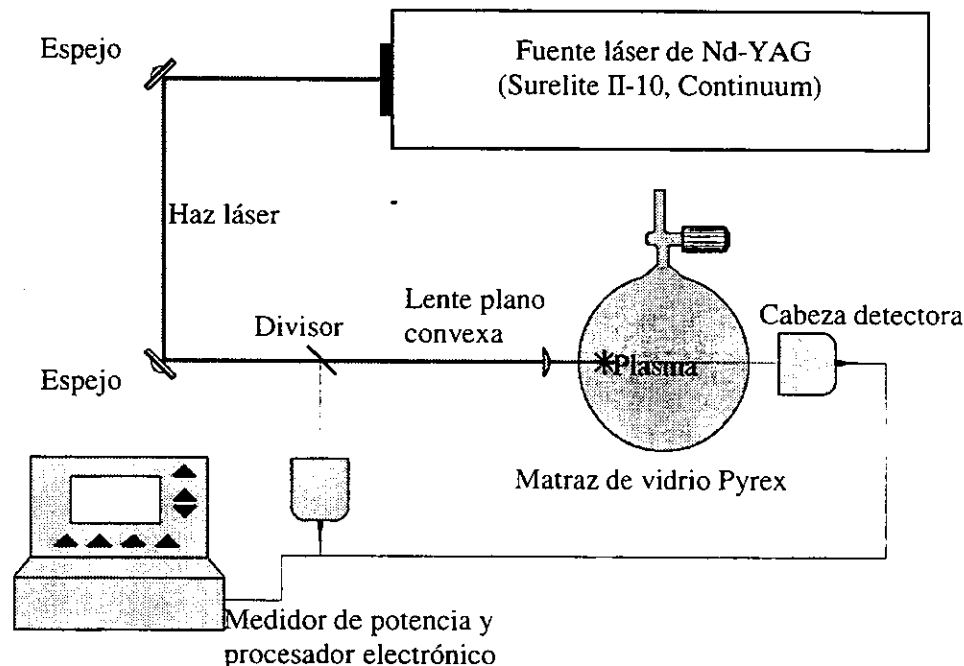


Figura 13. Esquema del arreglo experimental utilizado para realizar las irradiaciones de la troposfera de Titán con un haz láser utilizando el reactor III.

película de poliuretano. De esta manera se evita el intercambio de calor entre el interior del reactor y el medio que lo rodea.

3. 2. 3. Reactor del plasma iniciado por un haz láser

El reactor utilizado para las irradiaciones con el haz láser, reactor III representado en el esquema de la Fig. 13, es un matraz esférico de vidrio Pyrex (150 mm diámetro interno, 2.5 mm de espesor) con un volumen de 1.085 litros que puede ser conectado a la línea de vacío a través de una llave de teflón

3. 2. 4. Reactor de la radiación gamma

El reactor utilizado en las irradiaciones gamma (reactor IV) es también un matraz esférico con dimensiones de 70 mm de diámetro interno, 2.5 mm de espesor. El volumen de gas que puede albergar es de 0.0763 litros. La llave de teflón que conecta el reactor al sistema de vacío o al sistema de análisis está alejada del cuerpo del reactor por una extensión de vidrio Pyrex (150 mm \times 15 mm). Esto se debe a la degradación que sufren el barril y la capucha de la llave al ser expuestas a la radiación gamma. Para contrarrestar este efecto, se utilizó un barril de acero inoxidable y la capucha de la llave se protegió durante las irradiaciones con una cubierta

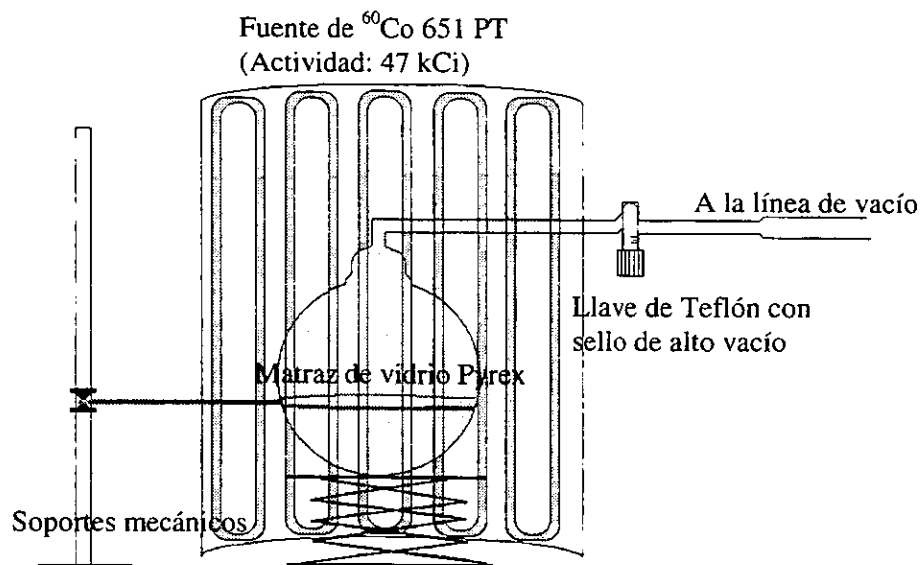


Figure 14. Representación esquemática del reactor IV y del arreglo experimental utilizado para la irradiación de la troposfera de Titán con fotones gamma.

hexagonal de plomo (100 mm × 130 mm × 100 mm) con un grosor de 50 mm que bloquea el paso de los fotones gamma. La representación esquemática del reactor IV se ilustra en la Fig. 14.

Para disminuir el riesgo de fugas o entrada de aire en los reactores, todas las entradas de las llaves de teflón y las conexiones que utilizan empaques circulares de FETFE se lubricaron con grasa fluorinada Krytox GPL.

3. 2. 5. Reactor de los análogos de los aerosoles estratosféricos

El reactor utilizado para la síntesis de los análogos de los aerosoles de la estratosfera de Titán se representa en la Fig. 15. Este reactor, en lo sucesivo identificado como reactor V, es un tubo de vidrio Pyrex en forma de "U" ubicado perpendicularmente para facilitar el depósito del material sólido. El reactor V tienen una longitud total de 250 mm, el diámetro interno del brazo superior es de 28 mm y el diámetro interno del brazo inferior es de 18 mm. El reactor cuenta en sus dos extremos con extensiones espirales de 8 mm de diámetro interno que permiten un mejor control del flujo de la mezcla gaseosa durante su paso por el interior del reactor. Además, en los extremos se ubican también dos electrodos de hierro (Fe) que generan una descarga luminosa, gracias a la cual es posible la síntesis de los análogos de aerosoles. El brazo superior del reactor es sellado por un empaque flexible de caucho y por una cubierta de plástico, esta particularidad

permite la introducción de placas de cuarzo (12×45 mm, Suprasil) sobre las cuales se depositan películas delgadas de los análogos de los aerosoles.

3. 2. 6. Limpieza de los reactores

El proceso de limpieza de los reactores I a IV fue como sigue: se lavaron con mezcla sulfonítrica (1:1) caliente (80°C), después se enjuagaron con agua corriente varias veces. Posteriormente se enjuagaron con agua bi y tridestilada lo suficiente para asegurar que la solución ácida había sido totalmente removida. Antes de ser utilizados, los reactores se secaron en la estufa a 150°C durante 12 horas. Una vez fríos, cada uno de ellos se evacuó siempre a 10^{-3} mbar, posteriormente se llenaban con algunos mbar de la mezcla gaseosa, se evacuaban nuevamente a 10^{-3} mbar y finalmente se llenaban con 670 mbar de la mezcla gaseosa simuladora de la troposfera de Titán. Este proceso se realizó para evitar contaminaciones en los sistemas de simulación.

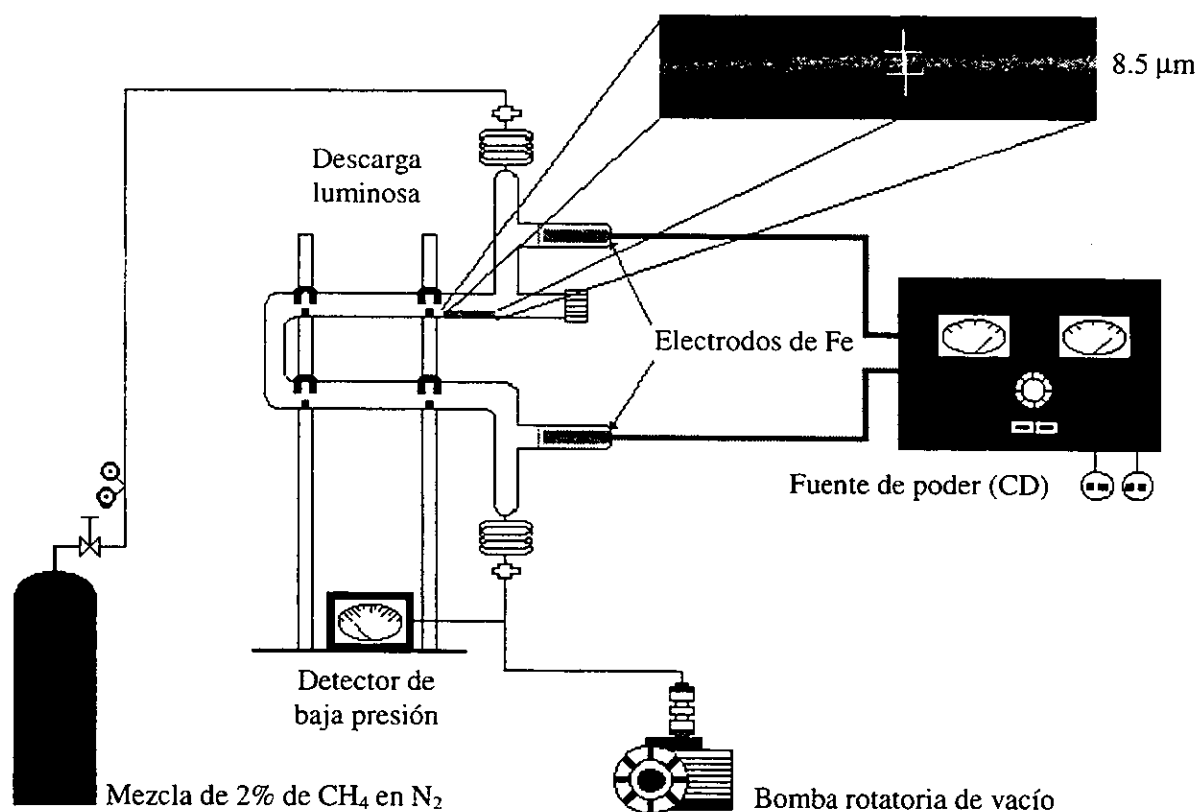


Figura 15. Representación esquemática del arreglo experimental en flujo continuo, utilizado para producir a los análogos de los aerosoles estratosféricos de Titán mediante irradiación de una mezcla de CH₄:N₂ (2:98) con una descarga luminosa desarrollándose en el interior del reactor V.

La limpieza del reactor V se efectuó como sigue: antes de realizar el depósito de los aerosoles, el interior del reactor y la placa de cuarzo a utilizar, son irradiados con un plasma de oxígeno:nitrógeno (20:80) a una potencia de 280 W durante 3 horas. Una vez que el cuerpo del reactor ha igualado la temperatura de su entorno, la mezcla gaseosa que simula a la estratosfera de Titán fluye durante 5 minutos. Transcurrido este tiempo se inicia la descarga luminosa entre los dos electrodos de hierro y comienza la síntesis de los análogos.

3. 3. Instrumentos utilizados en las diferentes irradiaciones

3. 3. 1. Descargas corona y de arco

El instrumento utilizado para inducir a ambos tipos de descargas fue un generador regulado de corriente directa (CD) de alta potencia (PS/EH30R03.0-DM, Glassman High Voltage Inc., Fig. 11). Este generador proporciona valores de voltaje y corriente estables (0.01%) de 0 a 30 kV y de 0 a 3 mA respectivamente por períodos de operación prolongados. Tiene la facilidad de cambiar la polaridad del voltaje aplicado y cuenta con una capacidad de salida de 100 W. Esta equipado con dos indicadores digitales que permiten leer el voltaje y la corriente de salida con una precisión del 0.2%. Por cuestiones de seguridad y para evitar la pérdida de la potencia eléctrica se utilizaron cables de alto voltaje (RG-8U) y uniones eléctricamente aislantes de teflón para conectar el generador a los reactores I y II.

Las descargas corona se generaron a partir de un arreglo coaxial. Esto se refiere a que hay un electrodo interno, la varilla de tungsteno, colocado al centro de una placa metálica la cual funciona como el electrodo circundante que se conecta siempre a tierra. El electrodo interno se conecta a la fuente de poder, que puede ser la bobina Tesla o el generador de alta potencia. Este arreglo origina descargas radiales.

Las descargas de arco se generaron entre el centímetro de separación que existe entre los dos electrodos de tungsteno internos (Fig. 12). Uno de ellos se conectó a la fuente de poder mientras que el otro actuó como el electrodo conectado a tierra.

3. 3. 2. Plasma iniciado por un haz láser

Este tipo de plasma se originó utilizando el haz de un láser de Nd-YAG con una amplitud de pulso de 7 ns que opera a una frecuencia de 10 Hz. El haz, de 1.06 μm de diámetro, se orientó hacia el reactor esférico (Fig. 13) utilizando espejos ópticos y se enfocó en el centro del reactor con ayuda de una lente plano-convexa de 5 cm de distancia focal y recubierta con una película

antirreflejante. El láser cuenta con un procesador electrónico y un medidor digital de potencia equipado con dos cabezas detectoras de energía.

3. 3. 3. Radiación gamma

Los fotones gamma (γ) utilizados provienen de la fuente de ^{60}Co del departamento de Química de Radiaciones del Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM. La fuente es un emisor de fotones γ que actúa mediante captura de neutrones, su actividad es de 47 kCi y la energía de los fotones γ que emite es de 1.33 MeV. Las reservas de ^{60}Co están organizadas en un arreglo cilíndrico (Fig. 14) y cuando no son utilizadas se encuentran sumergidas en un tanque de agua. La muestra a irradiar se sitúa, con la ayuda de soportes mecánicos en un lugar específico, y que debe ser el mismo para cada irradiación. Las fuentes se elevan fuera del tanque de agua, rodean al reactor que contiene la muestra y se inicia la irradiación con los fotones γ .

3. 3. 4. Descarga luminosa

La transformación química de la estratosfera simulada de Titán ocurre por la acción de una descarga luminosa originada entre dos electrodos de hierro (Fig. 15), los cuales se encuentran protegidos por una cubierta de mica que evita la contaminación de la mezcla por metal vaporizado. La descarga luminosa, establecida por un generador de corriente directa que cuenta con una potencia máxima de salida de 2 kW, se inicia a una diferencia de potencial de 4 kV y una intensidad de corriente de 7×10^{-4} A.

3. 4. Condiciones de las irradiaciones y cálculo de la energía disipada

El conocimiento de la cantidad de energía utilizada en cada uno de los experimentos de simulación es importante para determinar la eficiencia de las reacciones de transformación químicas y entender el papel relativo de las diferentes fuentes de energía en la síntesis de compuestos orgánicos en la atmósfera de Titán. A continuación se describe el método utilizado en la determinación de la potencia de cada uno de los diferentes arreglos experimentales utilizados durante la presente investigación. El rendimiento en función de la energía (P) de cada producto orgánico gaseoso formado en los experimentos de irradiación de la troposfera simulada de Titán puede calcularse una vez que se conoce la cantidad de energía que fluye por cada uno de los arreglos experimentales.

3. 4. 1. Descargas corona

Idealmente toda la energía producida por el generador de corriente directa debe disiparse en la descarga eléctrica, de modo que para conocer su valor numérico es necesario estimar la potencia de la descarga utilizando el voltaje y la corriente de salida del generador y la ley de la potencia:

$$W = V \times I$$

W = Potencia ($J s^{-1}$)

V = Voltaje (V)

I = Intensidad de corriente (A)

Por medio de las ventanas indicadoras de los valores de voltaje e intensidad de corriente con que cuenta el generador de alta potencia podía estimarse la potencia de las descargas. Sin embargo, las lecturas de voltaje que desplegaba el indicador oscilaban alrededor de un determinado valor dependiente del tiempo de ocurrencia de la descarga. Había que tener seguridad de que los valores que se leían eran los correctos. Para saberlo se utilizó un osciloscopio digital (Tektronics 524A) equipado con un procesador matemático avanzado y un sistema de almacenamiento de ondas. El osciloscopio tiene un ancho de banda de 500 MHz y una razón de muestreo de 500 megamuestras s^{-1} .

Dada la variabilidad en las lecturas de voltaje del sistema simulador de la troposfera de Titán, se tuvo que utilizar un sistema gaseoso inerte. El reactor I se llenó a 670 mbar de aire grado cero (Praxair, Inc.) y se irradió con descargas corona de polaridad positiva y negativa. El voltaje de estas descargas se midió conectando en paralelo el reactor al osciloscopio por medio de una sonda atenuadora de alto voltaje 1000x (P6015A, $\pm 3\%$ de precisión). Los valores de voltaje leídos en el indicador del generador y de la pantalla del osciloscopio eran idénticos.

Por otro lado para conocer la cantidad de corriente que fluía por las descargas corona se midió la caída de voltaje a través de una resistencia conectada en serie entre el reactor y el electrodo a tierra. La resistencia utilizada fue de 2×10^6 Ohm (Victoreen Inc. MOX-5-12, 1% de tolerancia).

La gráfica desplegada en la pantalla del osciloscopio (Fig. 17) indica que la corriente se propaga mediante pequeñísimos pulsos irregulares. El valor promedio del voltaje de estos pulsos se utilizó para calcular la corriente de las descargas mediante la ley de Ohm:

$$I = V / R$$

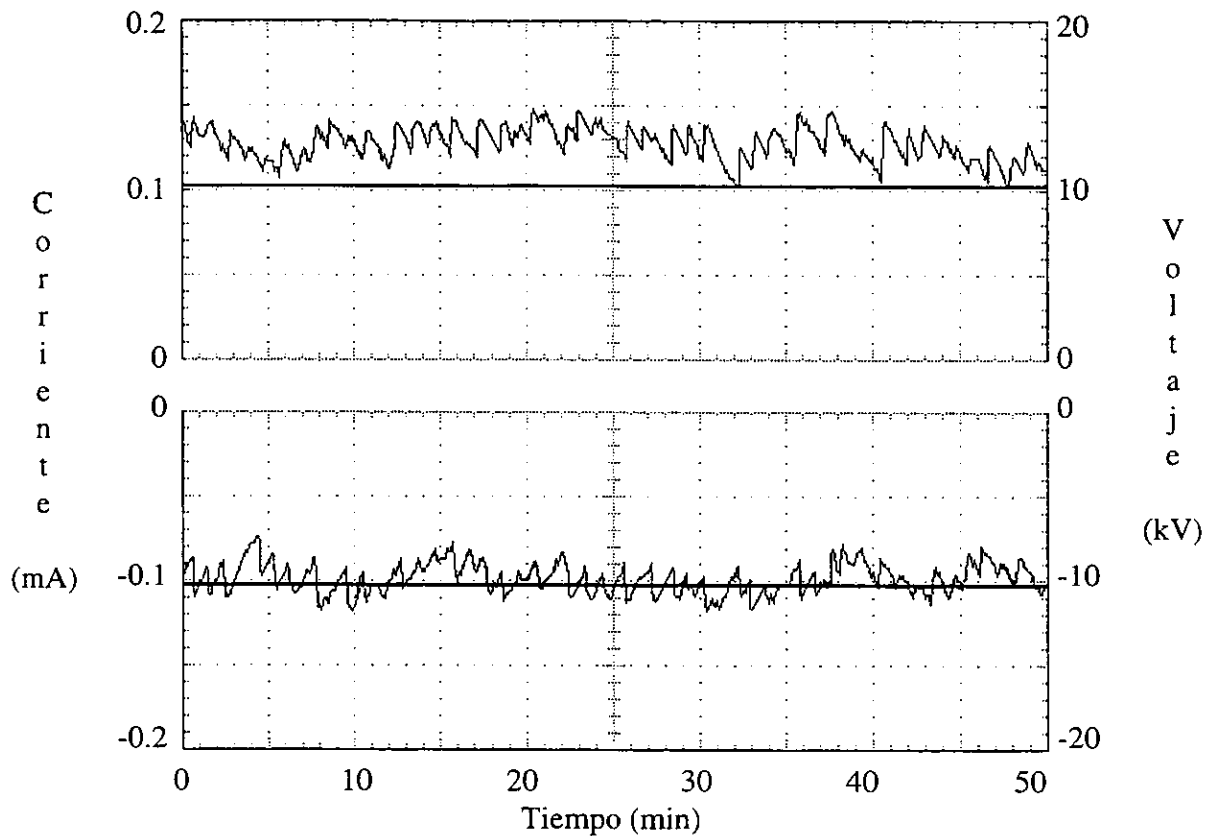


Figura 17. Oscilogramas del voltaje y de la intensidad de corriente de las descargas tipo corona positivas (superior) y negativas (inferior) disipadas durante 50 minutos de irradiación a 670 mbar de una mezcla de N_2 (90%) y CH_4 (10%) a 298 K contenida en el reactor II.

I = Intensidad de corriente (A)

V = Voltaje (V)

R = Resistencia (Ohm)

Antes de introducir en esta ecuación el valor del voltaje proporcionado por el osciloscopio (216 mV) hay que multiplicarlo por el valor de atenuación de la sonda utilizada (1000). El valor de intensidad de corriente obtenido a partir de la ecuación anterior fue de 1.08×10^{-4} A. En el indicador del generador de alta potencia, el valor de intensidad de corriente se mantuvo siempre en 1×10^{-4} A. Los resultados obtenidos con el sistema inerte de aire indicaron que la variabilidad inicialmente observada era una característica inherente de la atmósfera simulada y que los valores mostrados por los indicadores digitales del generador podían leerse de manera confiable y podía calcularse con ellos la potencia de las descargas corona.

El valor del voltaje de las diferentes irradiaciones realizadas sobre la troposfera simulada de Titán se monitoreó cada minuto. Las coronas con polaridad positiva presentaron voltajes de entre 11.2 kV a 14.5 kV, mientras que en las descargas de polaridad negativa, los valores estuvieron entre 7.9 kV y 11.2 kV. Estos intervalos comprenden las lecturas de voltaje monitoreadas durante los períodos de 2.5, 5.0, 10, 20, 30, 40, 50 y 60 minutos de irradiación. El valor medio de voltaje de cada período de irradiación multiplicado por el valor de la intensidad de corriente, siempre de 1×10^{-4} A, proporciona la potencia de la descarga en Watts (W). Multiplicando este valor por el intervalo de tiempo durante el que transcurre la descarga, en segundos, se obtiene el valor de la energía de las descargas corona en joules (J). Los valores de energía total obtenidos para las dos polaridades de las descargas se encuentran en la Tabla 7 del capítulo de Resultados y Discusión. Las gráficas del osciloscopio que ilustran las mediciones de voltaje e intensidad de corriente de la troposfera simulada de Titán están en la Fig. 17.

3. 4. 2. Descargas de arco

Las descargas de arco se caracterizan por ser un plasma de alta temperatura en el que la energía eléctrica inicial, puede convertirse en diferentes formas de energía como la utilizada para formar el plasma y la onda de choque, energía cinética, óptica, sónica, química, etc. Generalmente, la mayor parte se utiliza en aumentar la temperatura del canal en el que ocurre la descarga y en originar a la energética onda de choque que aumenta la energía cinética del gas circundante y que posteriormente se disipa como calor. En los experimentos de simulación de atmósferas planetarias se ha considerado, siguiendo el principio anterior, que el calor liberado por una descarga eléctrica puede utilizarse para calcular su potencia.

Los resultados de los primeros experimentos diseñados para calcular la potencia de una descarga eléctrica indicaban que el método calorimétrico calculaba una potencia 5 veces menor que la potencia real de la descarga haciendo que este método pareciera ser no útil para realizar estas estimaciones. Navarro-González *et al.* (1998) encuentran que la mayor deficiencia en la mayoría de esos experimentos radicaba en el uso de bobinas Tesla utilizadas para la generación de las descargas eléctricas. Estos instrumentos producen descargas altamente irregulares y con un ruido eléctrico considerable.

Para la estimación de la energía de las descargas de arco utilizadas en el presente trabajo, el uso de un calorímetro eficiente y la producción de descargas de arco estables y reproducibles originadas a partir de un generador regulado de corriente directa de alta potencia, garantizan la correcta determinación de la potencia de las descargas mediante el método calorimétrico.

El calorímetro o reactor II (Fig. 12) empleado en estos experimentos, se llenó a 670 mbar de la mezcla gaseosa de $\text{CH}_4:\text{N}_2$ que simula a la troposfera de Titán. Utilizando una fuente de poder regulada de corriente directa (FP-LAB1, Instrumentos de México, $V_{\text{max}} = 40 \text{ V}$, $I_{\text{max}} = 0.5 \text{ A}$) unida a los electrodos superiores del reactor, se suministraron diferentes cantidades de potencia eléctrica a la resistencia de 84Ω localizada dentro del reactor.

El calor disipado por la resistencia de nicromel, a una potencia determinada, se monitoreo con ayuda de la sonda de temperatura. La exactitud y precisión de la sonda son 0.1°C y $\pm 0.2^\circ\text{C}$, respectivamente. Para cada valor de potencia, 6.44, 4.56, 3.04, 2.01, 1.04 y 0.07 J s^{-1} , los experimentos se iniciaron con mezcla de $\text{CH}_4:\text{N}_2$ no irradiada. El cambio de temperatura del interior del reactor se monitoreo, por triplicado, durante 60 minutos en intervalos de 5 minutos. La razón de cambio de temperatura en función del tiempo (dT/dt) se calculó a partir de la pendiente de las gráficas lineales resultantes. Ejemplos de dos curvas típicas se muestran en la Fig. 18 para potencias de 4.56 y 6.44 J s^{-1} .

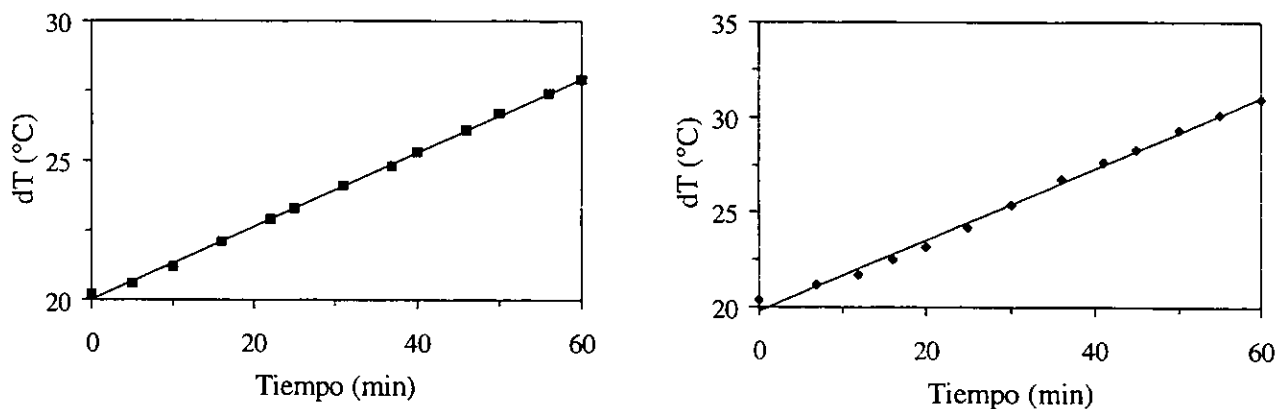


Figura 18. Incremento de la temperatura en función del tiempo producido por el calor disipado por la resistencia de nicromel operando a una potencia de 4.56 (izquierda) y 6.44 (derecha) J s^{-1} en 670 mbar de la troposfera simulada de Titán. La tasa de calentamiento se calcula a partir de la pendiente de las líneas de regresión.

Los diferentes valores de la razón de cambio de temperatura se utilizaron para construir la gráfica de calibración del calentamiento del interior del reactor en función del tiempo a diferentes potencias eléctricas en el intervalo de 0 a 6.5 J s^{-1} . Estos resultados se muestran en la Fig. 19. La

gráfica resultante se utilizó para calcular la potencia de la descarga de arco considerando la razón del cambio de temperatura del interior del reactor producido por la descarga de arco originada por el generador regulado de corriente directa de alta potencia. Las descargas de arco se produjeron en el reactor II conteniendo 670 mbar de la atmósfera simulada de Titán, a un voltaje de 10.68 ± 1.8 kV y a un valor de intensidad de corriente de 5×10^{-4} A. En estas condiciones, el cambio de temperatura observado corresponde a $1.9 \pm 0.23^\circ\text{C}$, iniciando a 21°C , durante un período de irradiación de 40 minutos monitoreando tres experimentos realizados bajo las mismas condiciones, a intervalos de 2 minutos.

El valor de dT/dt de la descarga de arco se interpola en la gráfica de la Fig. 19 para determinar la potencia eléctrica. La potencia de la descarga se estimó en $1.938 \pm 0.062 \text{ J s}^{-1}$. Multiplicando este valor por el intervalo de tiempo durante el que transcurre la descarga, en segundos, se obtiene el valor de la energía de las descargas de arco en Joules (J). Los valores de energía total obtenidos se encuentran en la Tabla 7 de la sección de Resultados y Discusión.

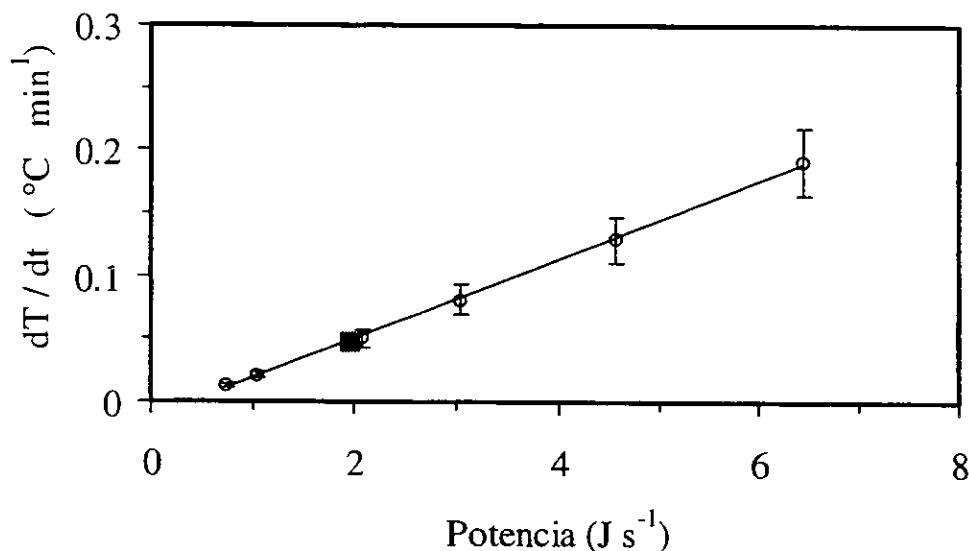


Figura 19. Dependencia de la tasa de calentamiento (dT/dt) de 670 mbar de la troposfera simulada de Titán en función de la potencia eléctrica (DC) aplicada a la resistencia de nicromel. El ■ muestra el valor de la potencia de la descarga de arco calculada por interpolación del valor de dT/dt obtenido según el método calorimétrico.

3. 4. 3. Radiación gamma

Los fotones gamma provienen de la reacción de decaimiento de un núcleo de ^{60}Co :



El rendimiento de una reacción de radiólisis se determina mediante el número de especies producidas por la absorción de una cantidad determinada de radiación a través del valor G de una reacción. Este valor se refiere en particular, al número de especies químicas que reaccionan o que se producen por cada 100 eV de energía absorbida.

La energía de los fotones originados en una determinada fuente emisora puede variar respecto al tipo y tiempo de emisión. Por lo que es necesario el uso de una especie química previamente calibrada. En el presente estudio, la síntesis de etano (C_2H_6) a partir de metano (CH_4), fue el sistema utilizado como dosímetro químico.

El valor G para el etano ($G_{\text{C}_2\text{H}_6}$) producido a partir de metano (CH_4) calculado por Hummel (1970) para un intervalo de 5×10^{17} a 1×10^{22} eV g^{-1} a 293 K y 1070 mbar resulta ser constante y tener un valor de 2.10 C_2H_6 por 100 eV. Cambios en la presión no alteran su valor de acuerdo a lo reportado por este autor; sin embargo un aumento de la temperatura a la que se realizan las irradiaciones tiende a incrementar su valor. Para un valor de temperatura de 324 K, (Arai *et al.*, 1981) reportan un valor de 2.25 C_2H_6 por 100 eV. El cálculo de la potencia de los fotones γ del presente estudio se realiza utilizando un valor de 2.10 ± 0.15 C_2H_6 por 100 eV.

El cociente de número de moléculas de etano producidas por unidad de tiempo ($d\text{C}_2\text{H}_6/dt$) se calculó a partir de la pendiente de la gráfica de la Fig. 20. Una presión de 1013 mbar de metano (CH_4), contenidos en el reactor III se expuso a la acción de los fotones γ de la fuente de ^{60}Co durante 2, 7, 16, 24 y 103 horas. La cuantificación del etano producido se realizó por cromatografía de gases utilizando un espectrómetro de masas como detector y una curva de calibración de etano. La pendiente de la gráfica de calibración se utilizó para realizar los cálculos de la dosimetría del metano y conocer el valor de $d\text{C}_2\text{H}_6/dt$ que resultó ser igual a $7.42 \pm 0.90 \times 10^{16}$ moléculas de C_2H_6 formadas durante una hora de irradiación con los fotones γ . El cociente de $d\text{C}_2\text{H}_6/dt$ y $G_{\text{C}_2\text{H}_6}$, con ambas cantidades en las unidades adecuadas, determina la energía de los fotones γ utilizada para realizar la transformación química de una determinada cantidad de metano en etano en función del tiempo:

$$2.06 \times 10^{13} \text{ C}_2\text{H}_6 \text{ s}^{-1} / 0.21 \text{ C}_2\text{H}_6 \text{ eV}^{-1} = 9.82 \times 10^{14} \text{ eV s}^{-1}$$

considerando los límites superior e inferior para el dividendo y para el divisor, el valor de la energía puede variar entre 9.29×10^{14} y $1.02 \times 10^{15} \text{ eV s}^{-1}$.

La potencia correspondiente a esta cantidad de energía es:

$$9.82 \times 10^{14} \text{ eV s}^{-1} \times 1.6022 \times 10^{-19} \text{ Joules eV}^{-1} = 1.57 \times 10^{-4} \text{ Watts}$$

La atmósfera simulada de Titán no está formada exclusivamente de metano, hay que recordar que esta atmósfera contiene únicamente un 10% de este gas. Las irradiaciones se realizaron utilizando solamente 670 mbar de la atmósfera simulada y no 1013 mbar, que fue la presión utilizada durante la dosimetría. El factor de corrección necesario para compensar las diferencias de composición, peso atómico y densidad electrónica de la atmósfera de Titán resultó ser de 0.78, por lo tanto:

$$1.57 \times 10^{-4} \text{ Watts} \times 0.78 = 1.23 \pm 0.54 \times 10^{-4} \text{ Watts}$$

es la potencia de la fracción de fotones γ utilizados para la transformación química de la atmósfera simulada de Titán. Multiplicando este valor por el intervalo de tiempo en el que transcurre la descarga, en segundos, se obtiene el valor de la energía de los fotones en Joules (J). Los valores de energía obtenidos se enlistan en la Tabla 7 de la sección de Resultados y Discusión.

3.4.4. Plasma inducido por un haz láser

La cantidad de energía depositada por el haz láser depende únicamente de la potencia del haz. La ausencia de cables conductores, electrodos y dispositivos eléctricos elimina las posibilidades de pérdida de alguna fracción de esta energía.

Durante las irradiaciones realizados en el presente estudio, el plasma se generó mediante pulsos de 7 nanosegundos de duración. Cada pulso contiene una energía de 0.168 Joules (J) y es producido a 10 Hz. Esta radiación láser pulsada produce un plasma de corta duración y altas temperatura y presión, similar al que ocurre en el canal de un relámpago o al ocasionado por el impacto de un bolido a alta velocidad, con la atmósfera. La cantidad de energía depositada en la mezcla gaseosa se determina como sigue: una fracción del haz láser, una vez direccionado con

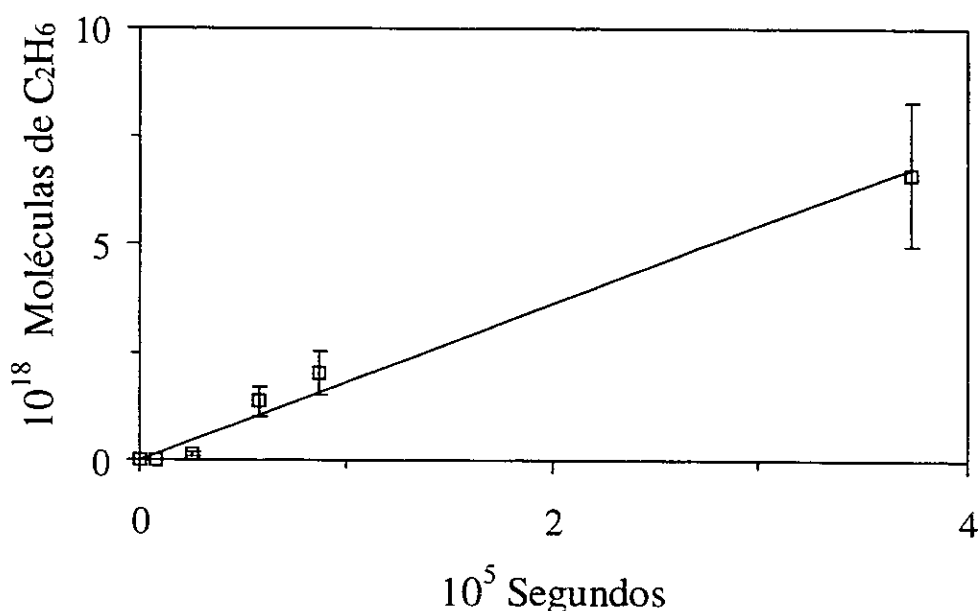


Figura 20. Dependencia del número de moléculas de etano (C_2H_6) sintetizadas a partir de 1013 mbar de metano por la acción de fotones gamma en función del tiempo de exposición.

ayuda de espejos hacia el reactor esférico IV, es desviada 90° hacia la primera cabeza detectora de energía (Fig. 13). El resto del haz se enfoca con la lente plano-convexa hacia el reactor IV, en el centro del cual se produce el plasma. La fracción del haz que no es utilizada continua su recorrido hasta que es medida por la segunda cabeza detectora localizada a 10 cm de distancia del reactor IV. La fracción de energía del haz láser incidente que fue absorbida por la mezcla gaseosa se calcula por la diferencia de energía registrada entre las dos cabezas detectoras. Su valor corresponde típicamente a 0.124 ± 0.013 J. Multiplicando el valor de la energía por la frecuencia del haz, 10 Hz, se obtienen la potencia promedio liberada por el haz hacia la mezcla que simula a la atmósfera de Titán: 1.24 ± 0.13 Watts. Al igual que en los casos anteriores, multiplicando este valor por el intervalo de tiempo durante el que ocurre la exposición, en segundos, se obtiene el valor de la energía utilizada en cada una de las irradiaciones las cuales comprenden triplicados de 5, 10, 15, 20, 25, 35 y 45 minutos. El total de energía depositado en cada caso se enlista en la Tabla 7 de la sección de Resultados y Discusión.

3. 4. 5. Descarga luminosa

Esta descarga es la utilizada para sintetizar a los análogos de los aerosoles de la estratosfera de Titán. En este caso la estimación detallada de la cantidad exacta de energía utilizada no es

indispensable. El valor de la potencia de la descarga luminosa se calcula siguiendo la ley de la potencia: $W = V \times I$ y utilizando los valores de voltaje e intensidad de corriente a los que se realizó la síntesis. Estos valores, establecidos al iniciarse la irradiación, corresponden a 4 kV y 0.7 A, de donde la potencia resultante es de 280 Watts. Para mantener constante este valor de potencia durante el transcurso de los experimentos fue necesario incrementar el valor de la corriente a 0.9 A. Esto debido a la influencia de las propiedades dieléctricas de las películas que se depositaban sobre la placa de cuarzo al tiempo que transcurre la descarga, las cuales ocasionaban un decremento del voltaje.

La Tabla 4 resume la potencia disipada por cada una de las fuentes energéticas utilizadas, así como el tiempo de irradiación a que se sometió la atmósfera simulada de Titán en cada caso.

3. 5. Síntesis de los análogos de aerosoles

Por otro lado, respecto a la producción del material análogo a los aerosoles de la estratosfera de Titán, la característica más relevante consiste en lograr el depósito, sobre placas de cuarzo, de muestras de calidad óptica suficiente para poder realizar las mediciones de transmitancia y reflectancia necesarias para calcular el valor del índice de refracción complejo. Este tipo de muestras consisten en películas de algunos micrómetros de espesor, lo suficientemente transparentes para permitir el paso de la radiación incidente. Estas películas se obtuvieron después de 120 y 240 minutos de irradiación, con descargas luminosas, de la mezcla que simula a la estratosfera de Titán utilizando el arreglo experimental de la Fig. 15.

Tabla 4. Estimación de la potencia disipada durante la irradiación de la atmósfera simulada de Titán (10% CH₄ en N₂) con diferentes fuentes energéticas.

Fuente de energía	Potencia (J s ⁻¹)	Tiempo de irradiación(min)
Fuente de ⁶⁰ Co	1.23×10^{-4}	1200 - 2400
Plasma inducido por un haz láser	1.24 ± 0.13	5.0 - 45
Descargas corona:		
Polaridad positiva	1.28 ± 0.17	2.5 - 60
Polaridad negativa	0.96 ± 0.16	2.5 - 60
Descargas de arco	2.0 ± 0.07	5 - 60
Descarga luminosa (aerosoles)	280 ± 12	120 y 240

3. 5. 1. Determinación del grosor de las muestras

El grosor de las muestras de los análogos de aerosoles se determinó con ayuda de un microscopio confocal (Zeiss LSM 410). Sobre la muestra se incide un haz con una longitud de onda de 488 nm proveniente de un láser de argón. Este haz induce fluorescencia en las muestras y permite diferenciar a la capa formada por los análogos de la placa de cuarzo, además de que pone en evidencia la naturaleza porosa de las muestras como se distingue en el recuadro de la Fig. 15. Se utilizó una lente $\times 63$ con 1.4 unidades de apertura. La resolución del objetivo se estableció en $0.21 \mu\text{m}$ en el plano XY y en $0.52 \mu\text{m}$ en la dirección Z. La visualización del total de la muestra en el plano formado por los ejes XZ permitió estimar una tasa de producción de aproximadamente $1 \mu\text{m}$ de película por hora de irradiación, para las condiciones en las que se realizó la síntesis de los análogos de aerosoles. Las microfotografías obtenidas (Fig. 15) permitieron además reconocer la estructura esférica de las partículas que constituyen a las muestras, las ligeras variaciones en el espesor y la diferencia en densidad.

3. 5. 2. Mediciones de transmitancia y reflectancia

Las mediciones de transmitancia y de reflectancia de los análogos de los aerosoles se determinaron en modo especular desde el ultravioleta cercano (220 nm) hasta el infrarrojo cercano (900 nm), utilizando un espectrofotómetro Cary 5 (Varian) cuya resolución es de 0.5 nm y puede cubrir el intervalo espectral de 100 a 2500 nm. Los valores de transmitancia se determinaron con un ángulo de incidencia normal del haz proveniente de una lámpara de tungsteno o de deuterio, sobre la muestra. Los valores de reflectancia se realizaron, con ayuda de un dispositivo en forma de V-W colocado entre la salida del haz de radiación y el sistema de detección, a un ángulo de incidencia de 8° . Debido a que las muestras tienen valores de reflectancia muy bajos, la radiación electromagnética es primero reflejada en un espejo de aluminio y después es direccionada hacia la muestra utilizando un pequeño espejo de plata. Después de incidir sobre la muestra, la radiación es redireccionada hacia el sistema de detección. La intensidad detectada corresponde a $R_{\text{alu}} \times R$. R_{alu} es la reflectancia del espejo de aluminio y R es la reflectancia de los análogos de aerosoles.

La determinación de la transmitancia y reflectancia también se realizó utilizando una esfera integrante. Esta técnica mide la cantidad de radiación que es difundida por la muestra y que generalmente no se considera en las mediciones realizadas de manera especular como las explicadas en el párrafo anterior. Realizando las mediciones con la esfera integrante, los valores de transmitancia y reflectancia se incrementan en 5.5% y 19%, respectivamente. Esto significa

que la fracción de radiación difundida es considerable y que debe de tomarse en cuenta para realizar los cálculos correspondientes a la estimación del índice de refracción complejo.

3. 5. 3. Cálculo del índice de refracción complejo

El índice de refracción complejo de un material sólido se define por la siguiente expresión:

$$m = n + ik$$

m = índice de refracción complejo

n = índice de refracción

k = coeficiente de extinción

El índice de refracción complejo es una función de la reflectancia (R), la transmitancia (T) y el grosor (d) de una película transparente del material, así como de la longitud de onda (λ). El conjunto de las ecuaciones que definen esta relación se conoce como fórmulas de Abelès (Apéndice A) y permiten realizar la estimación del índice de refracción (n) y del coeficiente de extinción (k) a partir de los valores de transmitancia y reflectancia de una muestra de espesor conocido.

Además de calcular el valor de los parámetros del índice de refracción complejo a partir de las mediciones de transmitancia y reflectancia en los modos especular y de esfera integrante, se evalúa la influencia de la porosidad y de la diferencia en el grosor de las películas depositadas en las placas de cuarzo, sobre el valor final de los parámetros n y k .

La porosidad, entendida como el contenido de aire presente en las muestras de los análogos de aerosoles, se determinó para las muestras de 120 y 240 minutos de irradiación a partir de las microfotografías confocales. El valor máximo se estableció en 0.3. El cálculo del índice de refracción (n) y del coeficiente de extinción (k) se realizó utilizando el modelo de Maxwell-Garnett (Maxwell-Garnett, 1904) variando el contenido de aire entre 0% y 50%.

Las microfotografías confocales demuestran que hay una variación importante, de al menos 1 μm , en el espesor de las películas de los análogos de los aerosoles depositadas sobre las placas de cuarzo. Por este motivo, los cálculos de los parámetros n y k se determinaron para los valores medio y extremos del grosor de las películas

3. 6. Condiciones del análisis cualitativo y cuantitativo de la fase gaseosa

Todas las muestras en fase gaseosa, producto de la transformación de la troposfera de Titán por las descargas corona y de arco, el plasma iniciado por un haz láser y la radiación gamma, fueron analizadas inmediatamente después de realizada la irradiación. Los análisis se realizaron utilizando tres técnicas acopladas distintas: cromatografía de gases (CG), espectrometría de masas (EM) y espectrometría de infrarrojo con transformadas de Fourier (EIRTF).

La cromatografía de gases se realizó en un cromatógrafo de gases de Hewlett Packard serie 5890. Las muestras fueron inyectadas al cromatógrafo mediante una válvula muestreadora de gases automática de seis puertos que está unida a un circuito de 2 ml, el cual a su vez está conectado a la columna. La entrada de la columna tiene un divisor de flujo. La razón de flujo utilizada fue de 23.65:1. La columna utilizada fue una PoraPlot Q (Hewlett Packard) de sílice fundida de 25 m de longitud, 0.32 mm de diámetro interno y un grosor de película (copolímero de estireno-divinilbenceno) de 10 μm . Esta columna se seleccionó por la excelente facilidad con que separa compuestos volátiles polares y no polares, su alta capacidad de retención, su gran estabilidad química y carácter hidrófobo y por el grado mínimo de sangrado que presenta aún a temperaturas de alrededor de 250°C. De acuerdo con un estudio realizado por Do y Raulin (1989) este tipo de columna es el más adecuado para la separación de los hidrocarburos y nitrilos de bajo peso molecular.

Para lograr una separación óptima de los compuestos orgánicos formados se utilizó un programa de temperatura el cual mantiene la columna a una temperatura de 30°C durante los primeros cuatro minutos de la corrida, después se inicia una rampa de calentamiento de 13°C min^{-1} que hace llegar la temperatura hasta los 240°C y se mantiene en este valor durante los 5.62 minutos finales de la corrida. El helio (grado cromatográfico, Praxair Inc.) se utilizó como gas acarreador con un flujo de 1.5 ml min^{-1} .

El espectrómetro de masas tipo cuadrupolo (5989B) y el detector de infrarrojo (TF 5965), ambos de Hewlett Packard, están conectados en paralelo al cromatógrafo de gases. El espectrómetro de masas puede funcionar en los modos de impacto electrónico y ionización química positiva y negativa. En el análisis de los productos originados en los experimentos de irradiación, el modo que se utilizó fue el de impacto electrónico con electrones energizados a 70 eV. La resolución de este instrumento es de 1 uma y su intervalo espectral es de 10 a 2,000 m/z. El detector de infrarrojo (TF) tiene una resolución espectral de 4 números de onda y un intervalo espectral de 4000 a 500 cm^{-1} . La temperatura de la celda del detector de infrarrojo es de 250°C. La

temperatura de las interfases que conectan al cromatógrafo de gases con el espectrómetro de masas y con el detector de infrarrojo es de 250°C. La identificación de las especies orgánicas formadas se realizó a través de los espectros de masas e infrarrojo registrados por los instrumentos. Además de una cuidadosa interpretación, los espectros de cada especie se compararon contra espectros de masas e infrarrojo de las bibliotecas electrónicas Wiley 138 y EPA-REVA respectivamente, las cuales corroboraron la identidad de cada compuesto analizado.

Para aumentar la sensibilidad de los métodos analíticos se utilizó el modo de monitoreo selectivo de iones (MSI). Esto después de saber que los iones comunes a los compuestos formados son: 15, 16, 26, 27, 29, 30, 41, 43, 51, 52, 54, 77, 78 y 91. El número de moléculas de cada una de las especies orgánicas gaseosas formadas se calculó utilizando el área bajo la curva de los cromatogramas de gases obtenidos y la pendiente de las rectas de calibración realizadas con mezclas gaseosas patrón de los hidrocarburos etano, eteno y etino (C₂) en argón y de etanonitrilo (CH₃CN) en nitrógeno. La Fig. 21 muestra las gráficas de calibración de los tres hidrocarburos C₂. La pendiente de la recta de calibración del etano se utilizó para conocer el número de moléculas de todos los hidrocarburos formados, excepto del eteno y etino, suponiendo una respuesta similar. La gráfica de calibración del etanonitrilo se muestra en la Fig. 22. La pendiente de la recta de calibración del etanonitrilo se usó para calcular el número de moléculas de todos los nitrilos formados en los experimentos de irradiación suponiendo, como en el caso de los hidrocarburos, una respuesta similar.

Las ecuaciones de las rectas de regresión obtenidas mediante el método de los mínimos cuadrados tienen la siguiente expresión algebraica:

$$\text{Respuesta} = (m \times \text{Presión de C}) + a$$

Respuesta = área bajo la curva en el cromatograma de los hidrocarburos C₂ o del etanonitrilo

m = pendiente de la recta de calibración

C = un hidrocarburo C₂ o el etanonitrilo

a = ordenada al origen de la recta de calibración

Utilizando estas ecuaciones se calculó el valor de presión correspondiente al valor de respuesta en el cromatógrafo de gases de cada compuesto X formado por las diferentes fuentes de energía. Los límites de confianza de cada una de estas presiones se calcularon considerando tres réplicas, 6 y 8 grados de libertad para los hidrocarburos C₂ y para el etanonitrilo respectivamente y un

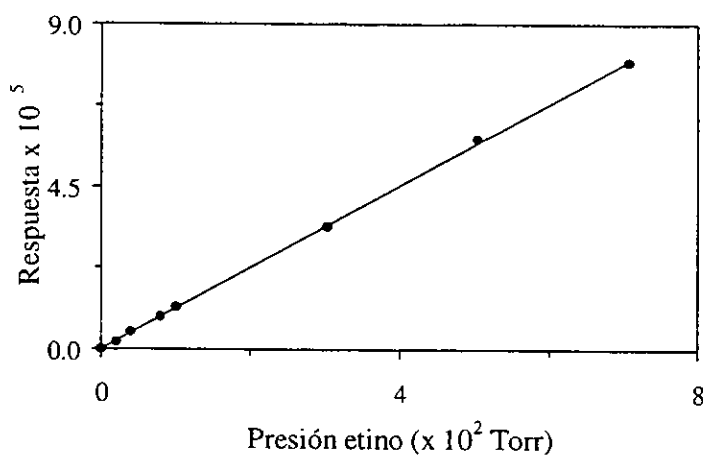
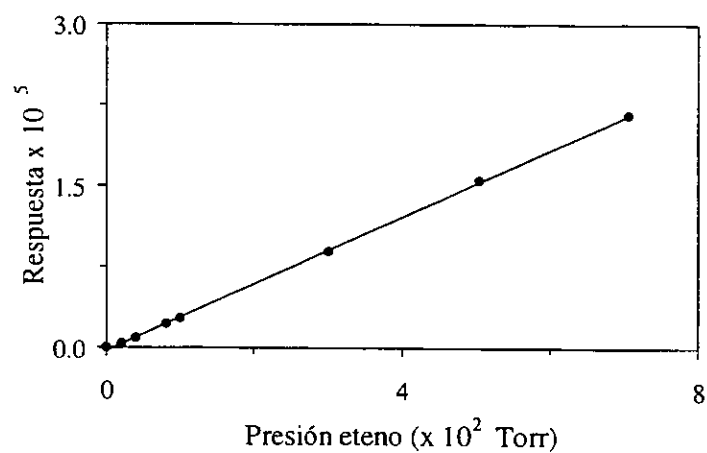
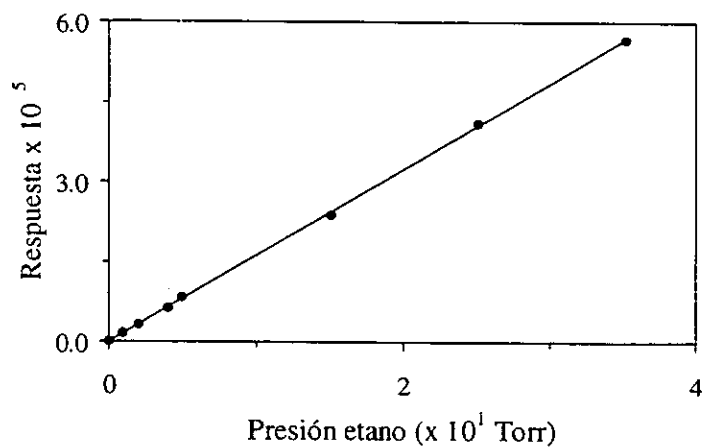


Figura 21. Gráficas de calibración de los hidrocarburos C₂ utilizadas para calcular el número de moléculas de hidrocarburos producidos en los experimentos de irradiación con descargas de tipo corona de una troposfera simulada de Titán. Las unidades del eje de las ordenadas (Respuesta) son arbitrarias.

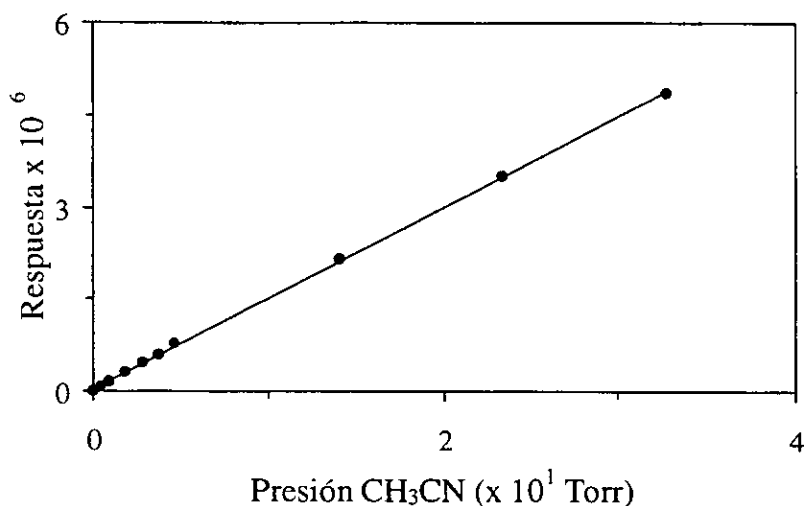


Figura 22. Gráfica de calibración del etanonitrilo utilizada para calcular el número de moléculas de los nitrilos producidos en los experimentos de irradiación con descargas de tipo corona de una troposfera simulada de Titán. Las unidades del eje de las ordenadas (Respuesta) son arbitrarias.

nivel de significancia del 95%. Sustituyendo el valor de la presión de cada especie X en fase gaseosa en la siguiente ecuación:

$$\text{Número de moléculas de } X = \frac{(\text{Presión de } X \times \text{Volumen del reactor II} \times N)}{(R \times T)}$$

Presión del compuesto X en atmósferas¹

Volumen del reactor correspondiente

$N = 6.022045 \times 10^{23}$ moléculas mol⁻¹, número de Avogadro

$R = 0.0820568$ L atm mol⁻¹ K⁻¹, constante de los gases ideales

$T = 298$ K, temperatura a la que se realiza el experimento

se obtiene el número de moléculas del compuesto X formadas en función del tiempo de irradiación. Graficando este número de moléculas ahora respecto a la cantidad de energía total

¹ 1 atmósfera = 1013 mbar

depositada en el sistema se obtienen gráficas de producción de las especies orgánicas formadas (Fig. 25 de la sección de Resultados y Discusión y gráficas del Apéndice B). De la región lineal de cada una de estas gráficas, se calcula la razón de producción de especies orgánicas por unidad de energía y este valor es el que se utiliza para reportar los rendimientos en función de la energía (P) listados en la Tabla 8 del capítulo de Resultados y Discusión.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4. 1. Transformación química de la troposfera simulada de Titán

La primera etapa de esta investigación consistió en la identificación de los productos formados al irradiar una atmósfera simulada de Titán con descargas corona y de arco que pueden desarrollarse entre las nubes troposféricas de metano, con un plasma iniciado por un haz láser cuyos efectos simulan la entrada de bólidos acelerados en la atmósfera y con fotones gamma que reproducen la acción de la radiación cósmica en la atmósfera baja de Titán. Las técnicas de identificación utilizadas establecen que la mayoría de los compuestos orgánicos gaseosos producidos son hidrocarburos (saturados, insaturados o aromáticos), nitrilos, así como compuestos cíclicos. Es notoria la presencia de mono- y di-ramificaciones metílicas en los hidrocarburos. La tabla 5 proporciona un listado de todos los productos sintetizados y las técnicas analíticas utilizadas en su identificación. Los espectros correspondientes pueden consultarse en el Apéndice B.

La información que proporcionan las espectroscopías de masas e infrarrojo (TF) permite conocer el número y tipo de átomos que constituyen a un compuesto, el tipo de enlace que une a estos átomos y los grupos funcionales que estos forman. Esta información vista en conjunto, ayuda a elucidar la estructura molecular del compuesto bajo identificación. De los espectros de masas de los productos formados por irradiación con las diferentes fuentes de energía, la primera información que puede conocerse a través del pico del ion molecular es su peso molecular. El pico del ion molecular permite además determinar si el compuesto contiene o no átomos de nitrógeno incorporados ya que los compuestos con relaciones de masa-carga (m/z) de número impar tienen un número impar de átomos de nitrógeno, como es el caso de los nitrilos. Relaciones de m/z pares sugieren compuestos que no contienen átomos de nitrógeno o que contienen un número par de estos átomos, por ejemplo los hidrocarburos o el etanodinitrilo (C_2N_2).

Los espectros de masas de los hidrocarburos con dos y tres átomos de carbono presentan poca complejidad y son de fácil interpretación. En la mayoría de los casos el pico más abundante o pico base corresponde a un fragmento que inequívocamente sugiere la estructura química de alguno de estos hidrocarburos. Al aumentar el número de carbonos en una molécula, su espectro de masas se va complicando. El patrón de fragmentación de los hidrocarburos con cadenas lineales saturadas de cuatro o más átomos de carbono se caracteriza por la presencia de grupos de picos separados por 14 unidades de masa distribuidos alrededor de los picos de $m/z = 43$ y $m/z = 57$, los cuales son en la mayoría de los casos, los de mayor intensidad. Se nota que al aumentar el peso molecular la intensidad del pico del ion molecular disminuye. Los espectros de masas de los hidrocarburos saturados ramificados son similares a los espectros de los hidrocarburos de cadena lineal pero presentan algunas características adicionales. A medida que el número de ramificaciones es mayor, el ion molecular puede ser muy pequeño o puede no aparecer. En estos casos, el pico que aparece a la mayor relación m/z debe corresponder a un fragmento de la molécula que sea el producto de una pérdida lógica como 15, 29 ó 43 unidades de masa que corresponderían a la pérdida de fragmentos como CH_3 , C_2H_5 o C_3H_7 . Es observable además, la fragmentación ocasionada por el rompimiento del enlace en la posición en que se encuentra la ramificación. Este rompimiento ocurre con más facilidad cuando el átomo de carbono está más sustituido y siempre el sustituyente de mayor masa es el que preferentemente se elimina como un radical o una molécula neutra, dejando un ion-fragmento que en muchas ocasiones corresponde al pico base o bien a uno de los picos más abundantes del espectro. Respecto a los compuestos insaturados, se nota que el ion molecular del espectro de masas es de mayor intensidad que el del correspondiente alcano por que el catión radical involucra a los electrones de la doble ligadura lo cual incrementa su estabilidad. En este tipo de compuestos, la ruptura que predomina es la alílica, perdiéndose, al igual que en el caso anterior, el fragmento de mayor masa. En los compuestos aromáticos la presencia del anillo estabiliza enormemente al ion molecular y provoca que este generalmente se presente como el pico base. Los compuestos aromáticos alquil sustituidos presentan inequívocamente un pico prominente de $m/z = 91$ ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2^+$) originado por la ruptura del enlace en la posición β respecto al anillo. Este ion generalmente experimenta un rearrreglo y origina al ion tropilium (C_7H_7^+), el cual tras la pérdida de una molécula neutra de acetileno ($\text{CH}\equiv\text{CH}$) origina al pico de $m/z = 65$, frecuentemente observado en los espectros de los compuestos aromáticos. En los bencenos monoalquílicos un grupo característico de iones originados por una ruptura α al anillo seguida de la migración de un hidrógeno aparece a $m/z = 77, 78$ y 79 . Por otro lado, el ion molecular de los nitrilos alifáticos es muy pequeño y en algunos casos ausente, pero el pico de $m/z = M-1$ es un pico diagnóstico al igual que el pico de $m/z = M-27$. Con cadenas hidrocarbonadas de al menos cuatro átomos de carbono, el pico base resultante de un rearrreglo de

Tabla 5. Productos orgánicos gaseosos obtenidos por la irradiación con diferentes formas de energía de 670 mbar de una mezcla de CH₄ (10%) y N₂ (90%) a 298 K.

Compuesto	Fórmula semidesarrollada	Técnica de identificación*
Hidrocarburos:		
Etano	CH ₃ CH ₃	EM, EIRTF
Eteno	CH ₂ =CH ₂	EM, EIRTF
Etino	CH ≡CH	EM, EIRTF
Propano	CH ₃ CH ₂ CH ₃	EM, EIRTF
2-Metilpropano	CH ₃ CH(CH ₃) CH ₃	EM, EIRTF
2, 2-Dimetilpropano	CH ₃ C(CH ₃) ₂ CH ₃	EM, EIRTF
Ciclopropano	C ₃ H ₆	EM
Propeno	CH ₂ =CH CH ₃	EM, EIRTF
2-Metilpropeno	CH ₂ =C(CH ₃) CH ₃	EM
Propino	CH ≡C CH ₃	EM
Propadieno	CH ₂ =C =CH ₂	EM
n-Butano	CH ₃ (CH ₂) ₂ CH ₃	EM, EIRTF
2-Metilbutano	CH ₃ CH(CH ₃) CH ₂ CH ₃	EM, EIRTF
2, 2-Dimetilbutano	CH ₃ C(CH ₃) ₂ CH ₂ CH ₃	EM, EIRTF
2, 2, 3-Trimetilbutano	CH ₃ C(CH ₃) ₂ CH(CH ₃) CH ₃	EM, EIRTF
1-Buteno	CH ₂ =CH CH ₂ CH ₃	EM
2-Buteno	CH ₃ CH =CH CH ₃	EM
2-Metil-2-buteno	CH ₃ C(CH ₃) =CH CH ₃	EM
Butino	CH ≡C CH ₂ CH ₃	EM
2-Butino	CH ₃ C ≡C CH ₃	EM
1-Buten-3-ino	CH ₂ =CH C ≡CH	EM
2-Metil-1-Buten-3-ino	CH ₂ =C(CH ₃) C ≡CH	EM
1, 3-Butadieno	CH ≡C C ≡CH	EM
n-Pentano	CH ₃ (CH ₂) ₃ CH ₃	EM, EIRTF
2-Metilpentano	CH ₃ CH(CH ₃) (CH ₂) ₂ CH ₃	EM, EIRTF
3-Metilpentano	CH ₃ CH ₂ CH(CH ₃) CH ₂ CH ₃	EM, EIRTF
2, 2-Dimetilpentano	CH ₃ C(CH ₃) ₂ (CH ₂) ₂ CH ₃	EM, EIRTF

Tabla 5. (Continuación).

Compuesto	Fórmula semidesarrollada	Técnica de identificación*
2, 3-Dimetilpentano	$\text{CH}_3 \text{CH}(\text{CH}_3) \text{CH}(\text{CH}_3) \text{CH}_2 \text{CH}_3$	EM, EIRTF
3, 3-Dimetilpentano	$\text{CH}_3 \text{CH}_2 \text{C}(\text{CH}_3)_2 \text{CH}_2 \text{CH}_3$	EM, EIRTF
3-Penten-1-ino	$\text{CH} \equiv \text{C} \text{C} = \text{CH}_2 \text{CH}_3$	EM
1, 3-Pentadieno	$\text{CH}_2 = \text{CH} \text{CH} = \text{CH} \text{CH}_3$	EM
Ciclopentadieno	C_5H_6	EM
n-Hexano	$\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_4 \text{CH}_3$	EM, EIRTF
2, 2-Dimetilhexano	$\text{CH}_3 \text{C}(\text{CH}_3)_2 (\text{CH}_2)_3 \text{CH}_3$	EM
n-Heptano	$\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_5 \text{CH}_3$	EM, EIRTF
Benceno	C_6H_6	EM
Metilbenceno	$\text{C}_6\text{H}_5 (\text{CH}_3)$	EM
Vinilbenceno	$\text{C}_6\text{H}_5 (\text{CH} = \text{CH}_2)$	EM
Etilbenceno	$\text{C}_6\text{H}_5 (\text{C} \equiv \text{CH})$	EM
Nitrilos:		
Metanonitrilo	HCN	EM
Etanodinitrilo	CN CN	EM
Etanonitrilo	$\text{CH}_3 \text{CN}$	EM, EIRTF
Propanonitrilo	$\text{CH}_3 \text{CH}_2 \text{CN}$	EM, EIRTF
2-Metilpropanonitrilo	$\text{CH}_3 \text{CH}(\text{CH}_3) \text{CN}$	EM
2-Propenonitrilo	$\text{CH}_2 = \text{CH} \text{CN}$	EM
Butanonitrilo	$\text{CH}_3 \text{CH}_2 \text{CH}_2 \text{CN}$	EM, EIRTF

* EM = Espectrometría de masas en modo de impacto electrónico a 70 eV.

EIRTF = Espectrometría de infrarrojo (Transformada de Fourier) con una resolución de 4 cm^{-1} .


McLafferty que sufre la molécula es $m/z = 41$. En todos los casos, reuniendo a los pequeños fragmentos con los que se justifican los picos del espectro de masas, puede proponerse una estructura química. Esta debe tener concordancia con la información que proporcionen los espectros de infrarrojo y con el comportamiento general de los productos en la cromatografía de gases.

La espectroscopía de infrarrojo detecta las vibraciones provocadas en las moléculas por la incidencia de radiación de la región de 2.5×10^3 a 25×10^3 nm del espectro electromagnético. Los espectros de infrarrojo se interpretan en términos de los números de onda (cm^{-1}) de las bandas correspondientes a vibraciones de tipo resorte (stretching) y de tipo dobléz (bending) simétricas y asimétricas. Los diferentes tipos de enlace entre los átomos de una molécula producen bandas características con las que se facilita su identificación. En los hidrocarburos por ejemplo, las vibraciones de tipo dobléz o de tipo resorte que corresponden al enlace C-H son las más significativas y presentan bandas de considerable intensidad. Las bandas más predominantes y que aportan la mayor información en los compuestos aromáticos corresponden a las originadas por los enlaces C-H y C-C del anillo aromático, estas últimas presentes frecuentemente como dobletes. En cambio, los espectros de infrarrojo de los nitrilos se caracterizan por absorciones de mediana o muy poca intensidad originadas principalmente por las vibraciones de tipo resorte del enlace $\text{C}\equiv\text{N}$. En la Tabla 6 se recopilan los intervalos de absorción en base a los cuales se realizaron las asignaciones de los grupos químicos característicos de los compuestos producidos en este estudio.

La información que proporciona el espectro de infrarrojo por sí sola no es suficiente para elucidar la estructura química de un compuesto. Más aún, es difícil diferenciar entre moléculas de compuestos que pertenecen a una misma familia debido a que los números de onda en que se presentan las bandas de absorción de los diferentes grupos químicos son muy cercanos y las bandas frecuentemente se sobreponen. Esto es lo que sucede con las absorciones de los grupos metilo y metileno presentes en los espectros tanto de los hidrocarburos como de los nitrilos. Resulta claro sin embargo, que la identificación de absorciones características de grupos químicos específicos es tarea sencilla. La presencia de grupos como el isopropilo se puede asegurar si en el espectro se observan las correspondientes bandas gemelas de igual intensidad cerca de 1385 y 1470 cm^{-1} . Al grupo terbutilo corresponden dos bandas entre 1395 y 1370 cm^{-1} la primera de las cuales es de mayor intensidad. El triple enlace del grupo $\text{C}\equiv\text{N}$ de los nitrilos se caracteriza por una banda fina que se encuentra entre 2260 y 2240 cm^{-1} siempre que la cadena hidrocarbonada sea de más de cuatro átomos de carbono. Las vibraciones del enlace C-H de los derivados del benceno son las más intensas y aparecen en la región de 3100 - 3000 cm^{-1} acompañadas de absorciones también intensas en la región de baja frecuencia entre 900 y 675 cm^{-1} . Conjuntando esta información con la proporcionada por los espectros de masas y comparándola con aquella que se obtiene de las bibliotecas electrónicas, puede garantizarse que la estructura química propuesta para un determinado compuesto es acertada.

Además de las características espectroscópicas, una observación detallada de los cromatogramas obtenidos clarifica la identificación. Los picos cromatográficos presentan tiempos de retención mayores al aumentar su número de átomos de carbono. En general, los hidrocarburos insaturados tienen un tiempo de retención menor que el correspondiente hidrocarburo saturado. Otra característica es que los compuestos más ramificados eluyen antes que los menos ramificados. Estos comportamientos son resultado del incremento en el punto de ebullición que tiene un compuesto al aumentar el número de carbonos en su molécula y mantener la linealidad de su cadena principal. Los compuestos aromáticos presentan los mayores tiempos de retención. Esto se explica si se considera que son los productos con mayor masa y mayor afinidad por la fase estacionaria dada la similitud de la naturaleza química entre ambos.

Tabla 6. Regiones de absorción características de las vibraciones de los grupos químicos correspondientes a hidrocarburos y nitrilos*.

Grupo químico	Región de absorción (cm ⁻¹)			
	Vibraciones tipo resorte		Vibraciones tipo doblez	
	Asimétricas	Simétricas	Asimétricas	Simétricas
-CH ₃	2975 - 2950	2885 - 2865	1465 - 1440	1390 - 1370
-CH ₂ -	2940 - 2915	2870 - 2840	1480 - 1440	-----
-CH ₂ - cíclico	3100 - 3070	3040 - 2995	1420 - 1400	1365 - 1295
 -H	2890 - 2880	-----	~ 1340	-----
Isopropilo	-----	-----	1385 - 1380	1470 - 1465
Terbutilo	-----	-----	1395 - 1385	1375 - 1365
-C=C-	1680 - 1620	-----	-----	-----
-CH=CH ₂	3095 - 2995	-----	1420 - 1290	995 - 905
-CH=CH- aromático	1600 - 1585	1500 - 17400	1300 - 100	900 - 675
-C≡C-	2260 - 2100	-----	-----	700 - 610
≡C-H	3340 - 3300	970 - 890	1375 - 1125	695 - 575
-C≡N	2260 - 2230	580 - 525	-----	-----

*Socrates (1994).

Para mejorar la sensibilidad de los análisis, la detección de las especies formadas se realizó, una vez establecida la identidad química de cada uno de los compuestos sintetizados, operando el espectrómetro de masas en el modo de monitoreo selectivo de iones (MSI). De esta manera, los límites de detección se optimizan en un factor de 1000 dado que el espectrómetro de masas realiza un barrido selectivo de iones específicos. Los iones seleccionados incluyen a 15, 16, 26, 27, 29, 30, 41, 43, 51, 52, 54, 77, 78 y 91. Estos iones se eligieron por corresponder a las relaciones de masa-carga (m/z) principales en los espectros de los diferentes tipos de compuestos identificados. Los cromatogramas de la Fig. 23 son un ejemplo de la separación de la mezcla gaseosa obtenida después de 40 minutos de irradiación de la troposfera simulada de Titán con descargas de arco (A), plasma iniciado por un láser (B), descargas corona positivas (D) y negativas (E) y 40 horas con fotones gamma (C).

La estimación de los rendimientos en función de la energía de las especies orgánicas gaseosas sintetizadas a partir de la exposición de la atmósfera simulada de Titán ante descargas corona de polaridad positiva y negativa, descargas de arco, un plasma inducido por láser y fotones gamma es uno de los principales objetivos del presente estudio. Los resultados obtenidos al realizar este tipo de experimentos llevan a conclusiones interesantes. La energía depositada, en cada uno de los casos anteriores, se estimó de acuerdo a lo mencionado en la sección de Desarrollo Experimental. La tabla 7 presenta los valores de energía estimados. Puede observarse que estos valores se mantienen dentro de un mismo orden de magnitud en relación al tiempo de irradiación. La excepción son los valores correspondientes a los fotones gamma, los cuales requieren de tiempos de exposición muy prolongados para depositar apenas el 10% de la energía depositada por el menor tiempo de irradiación de la fuente menos energética, las descargas corona positivas. La cantidad y el tipo de compuestos formados en cada caso es diferente, como puede observarse en los cromatogramas de la Fig. 23.

A continuación se presentan y discuten, en primer término, los resultados obtenidos por la irradiación de la troposfera de Titán con las descargas corona de polaridad positiva y negativa que se postulan como la forma de disipación de energía existente entre las nubes de metano.

Las descargas eléctricas se han estudiado mejor en la atmósfera terrestre que en ninguna otra. Se sabe que aproximadamente el 50% de las descargas que ocurren son de tipo nube-nube y que van seguidas muy de cerca por las descargas de tipo nube-superficie (Uman y Krider, 1989). Las descargas entre las nubes y la superficie son las más conocidas debido a las facilidades que presentan para su estudio. Estas descargas pueden ser iniciadas por un flujo descendente o

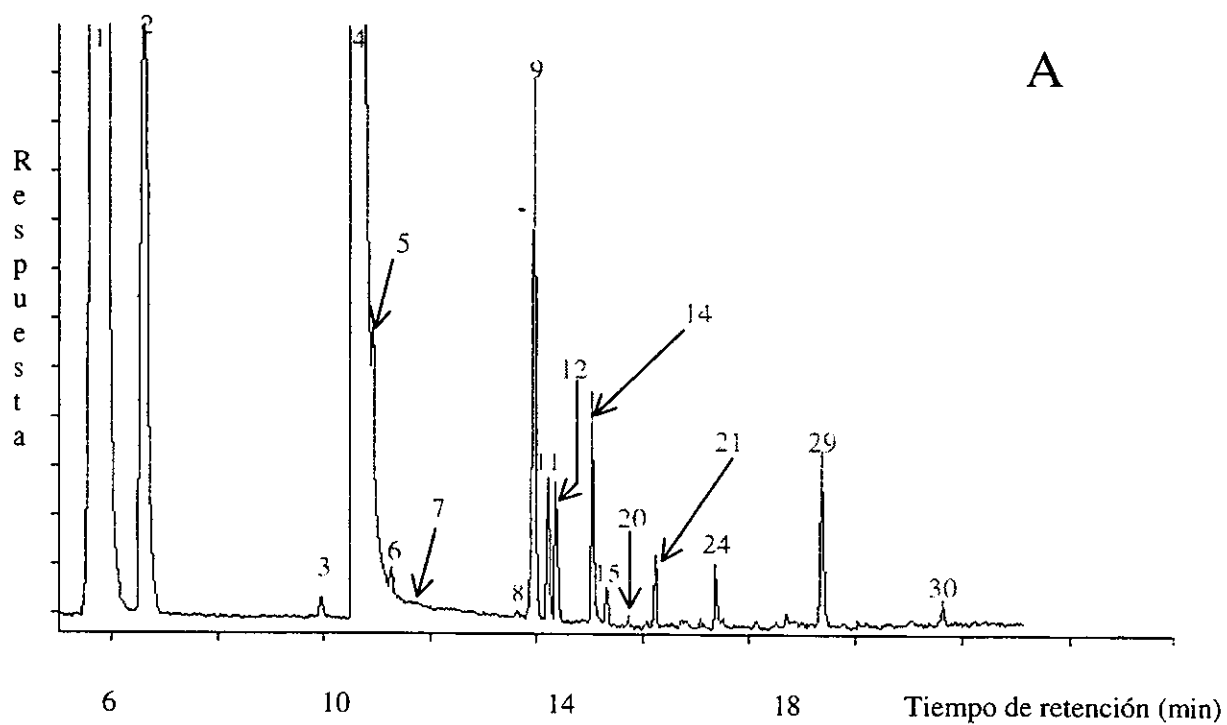


Figura 23a. Separación cromatográfica de los hidrocarburos y nitrilos producidos por 35 minutos de irradiación de 670 mbar de una mezcla de CH_4 en N_2 a 293 K con descarga de arco.

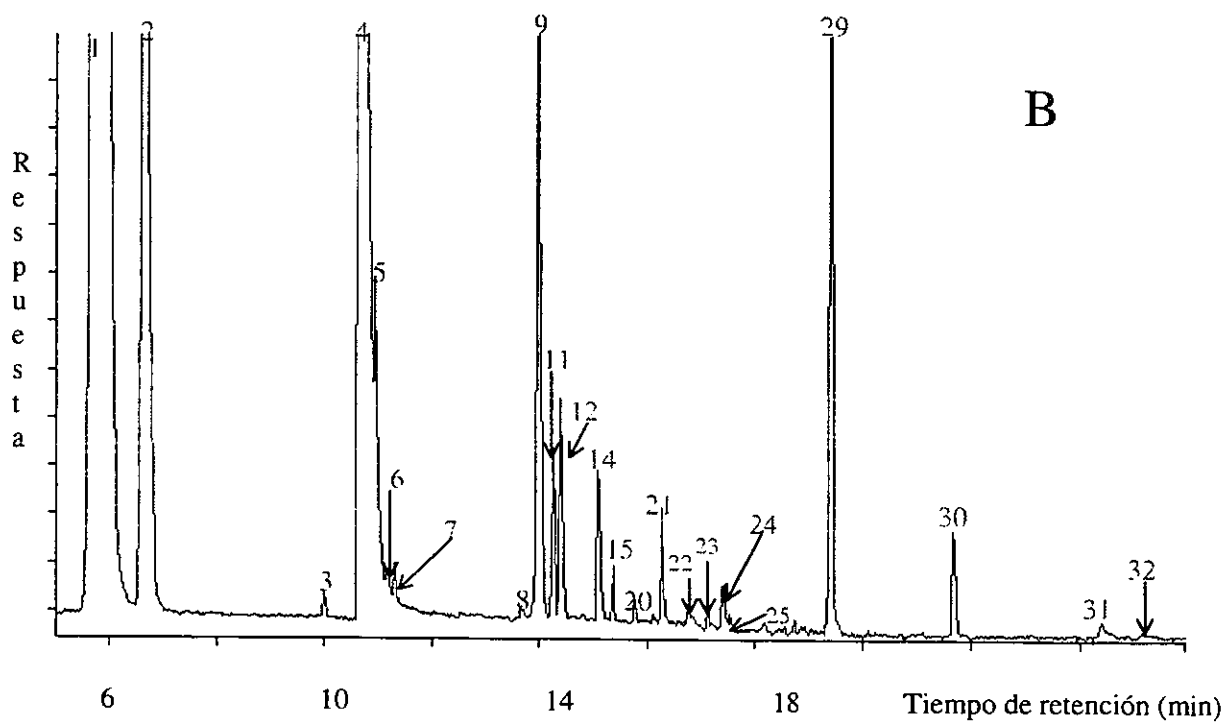


Figura 23b. Separación cromatográfica de los hidrocarburos y nitrilos producidos por 40 minutos de irradiación de 670 mbar de una mezcla de CH_4 en N_2 a 293 K con un plasma iniciado por un haz láser.

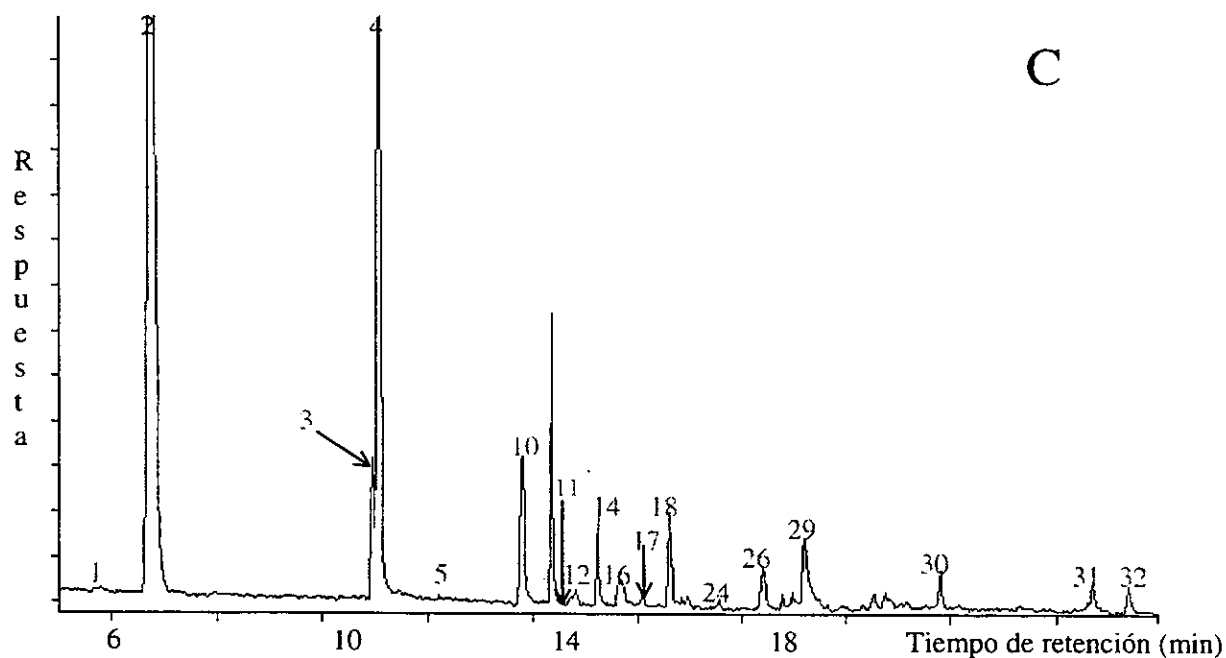


Figura 23c. Separación cromatográfica de los hidrocarburos y nitrilos producidos por 40 horas de irradiación de 670 mbar de una mezcla de CH_4 en N_2 a 293 K con radiación gamma.

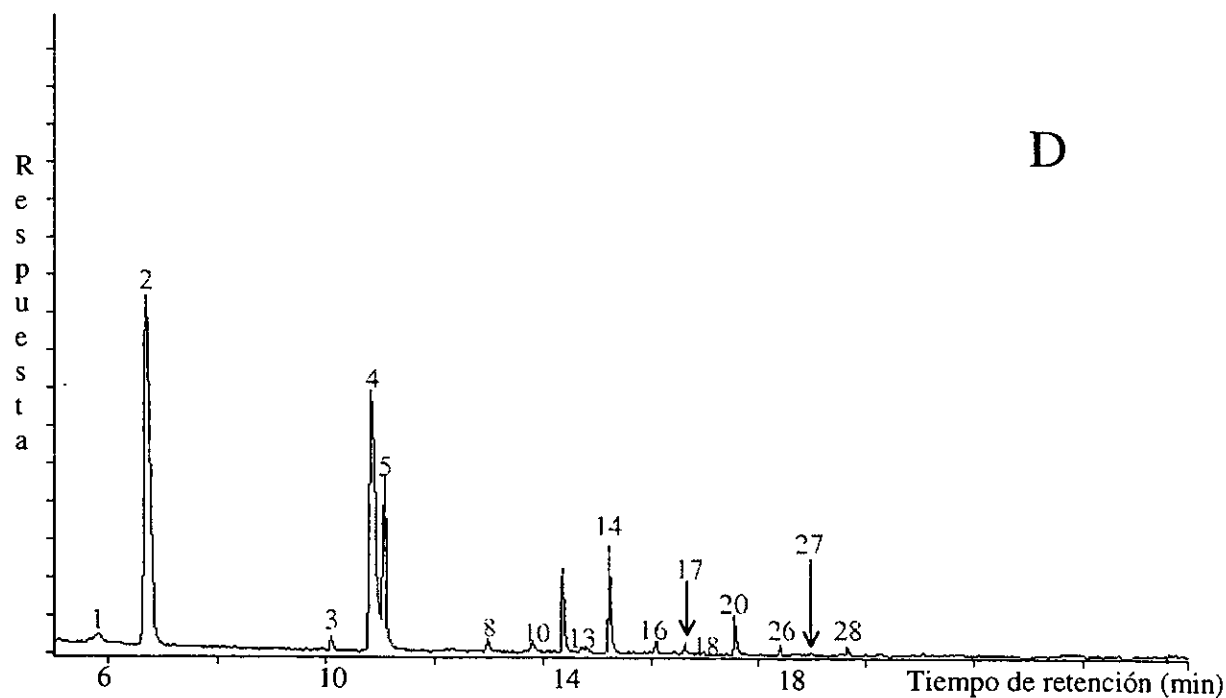


Figura 23d. Separación cromatográfica de los hidrocarburos y nitrilos producidos por 40 minutos de irradiación de 670 mbar de una mezcla de CH_4 en N_2 a 293 K con descargas corona positivas.

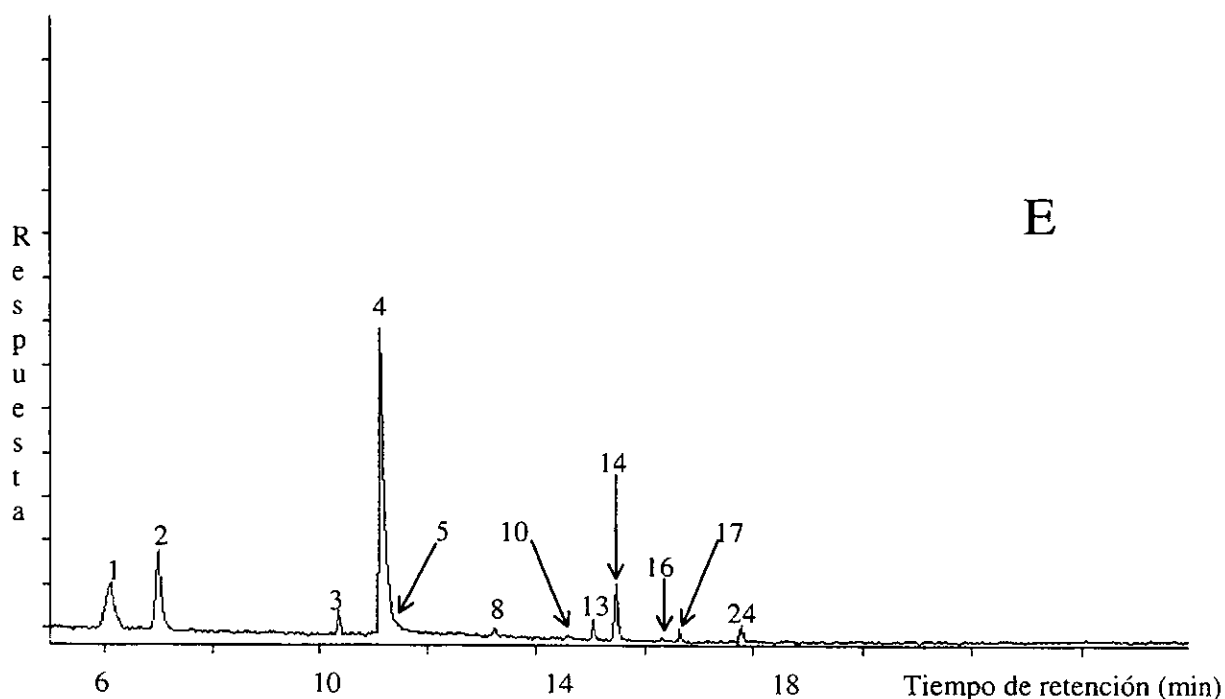


Figura 23e. Separación cromatográfica de los hidrocarburos y nitrilos producidos por 40 minutos de irradiación de 670 mbar de una mezcla de CH_4 en N_2 a 293 K con descargas corona negativas.

Figura 23. Separación mediante cromatografía de gases empleando monitoreo selectivo de los iones 15, 16, 26, 27, 29, 30, 41, 43, 51, 52, 54, 77, 78 y 91, de una mezcla de hidrocarburos (C_2 a C_8) y de nitrilos (C_1 a C_4) producidos por irradiación de 670 mbar de una mezcla de 10% de CH_4 en N_2 a 293 K, con descargas de arco (A), plasma iniciado por un láser (B), fotones gamma (C), descargas corona de polaridad positiva (D) y negativa (E). Condiciones: columna: 25 m x 0.32 mm D.I. PoraPLOT Q sílice fundida; flujo del gas acarreador: 1.2 ml min^{-1} (He); programa de temperatura: isoterma a 30°C durante 4 min, $13^\circ\text{C min}^{-1}$ hasta 240°C , isoterma a 240°C durante 5.62 min; razón de división de flujo: 10.08:1; detector: espectrómetro de masas. Identificación de los picos: 1 = eteno-etino; 2 = etano; 3 = etanodinitrilo; 4 = metanonitrilo; 5 = propeno; 6 = propano; 7 = propino; 8 = ciclopropano; 9 = 2-metilpropano; 10 = 1-buteno; 11 = 2-metilpropeno; 12 = n-butano; 13 = 2-buteno; 14 = etanonitrilo; 15 = 2,2-dimetilpropano; 16 = 2-metil-2-buteno; 17 = 2-metilbutano; 18 = n-pentano; 19 = propanonitrilo; 20 = 2-metilpropanonitrilo; 21 = 2,2-dimetilbutano; 22 = 2,3-dimetilbutano; 23 = 2-metilpentano; 24 = 3-metilpentano; 25 = butanonitrilo; 26 = n-hexano; 27 = 2,2-dimetilhexano; 28 = 2,2-dimetilpentano; 29 = 2,2,3-trimetilbutano; 30 = 3,3 dimetilpentano; 31 = 2,3= dimetilpentano; 32 = n-heptano; 33 = 2,4-dimetilhexano; 34 = 2,2,3,4-tetrametilpentano; 35 = 4-metilheptano; 36 = n-octano; 37 = 3-metilheptano.

Tabla 7. Cantidad de energía total depositada (J) en la atmósfera simulada de Titán (10% CH₄ en N₂) por la irradiación con diferentes fuentes de energía.

Tiempo de irradiación (min)	Energía total depositada ($\times 10^3$ J)				
	Coronas positivas	Coronas negativas	Arco eléctrico	Plasma inducido por un haz láser	Fotones Gamma
2.5	0.178	*	*	*	*
5.0	0.369	*	*	0.372	*
10	0.732	0.402	1.163	0.744	*
15	---	---	1.744	1.116	*
20	1.464	0.756	2.326	1.489	*
25	---	---	---	1.861	*
30	2.214	1.824	3.488	---	*
35	---	---	---	2.605	*
40	3.024	1.944	4.651	---	*
45	---	---	---	3.143	*
50	3.750	2.550	5.814	---	*
60	4.536	3.204	6.977	---	*
1200					0.010
2400					0.020

* Las irradiaciones que corresponden a estos períodos de tiempo no se realizaron debido a que la formación de compuestos es muy pequeña y queda fuera de los límites de detección del sistema de análisis. Las casillas marcadas con --- corresponden a tiempos de irradiación no realizados.

ascendente de cargas positivas o negativas. Los relámpagos iniciados por descargas descendentes positivas mueven una mayor cantidad de corriente, 200 a 300 kA, y hacen una transferencia de carga hacia la Tierra también mayor si se comparan con los iniciados por flujos de carga negativa. Los flujos ascendentes de carga son menos frecuentes (Uman y Krider, 1989).

Las descargas corona postuladas para las nubes de metano de la troposfera de Titán, probablemente exhiben un comportamiento similar al de ocurrencia de los relámpagos terrestres. Es muy probable que las descargas corona sean iniciadas por flujos de carga positivas y negativas también ascendentes y descendentes. El dipolo eléctrico de las nubes de Titán facilita la aparición de descargas corona partiendo de la base de la nube hacia la superficie del satélite. Además, las nubes podrían sufrir deformaciones, originadas por las corrientes convectivas por ejemplo, de modo que las cargas positivas de la cima de las nubes se separen horizontalmente de las cargas negativas. Esto origina el desarrollo de descargas corona positivas partiendo también de la nube hacia la superficie. La acumulación de cargas de una determinada polaridad en la parte baja de la

nube induce la acumulación de cargas de la polaridad opuesta en elevaciones de la superficie de Titán. El resultado de este fenómeno es la formación de un campo eléctrico que provoca un flujo de cargas descendentes y ascendentes, las cuales al encontrarse forman el canal de conducción de la descarga. Cuando el flujo de cargas por este canal se hace más intenso, se producen descargas corona positivas y negativas.

La producción de especies orgánicas en fase gaseosa a partir de la exposición de la troposfera simulada de Titán ante descargas corona de polaridad positiva o negativa, es uno de los aspectos más peculiares del presente trabajo. De acuerdo a los resultados listados en la Tabla 7, la energía disipada por las coronas positivas es, en promedio, 1.6 veces superior a la disipada por las coronas negativas. La cantidad y el tipo de compuestos formados en cada caso es también diferente, como puede observarse en los cromatogramas de la Fig. 24, los cuales presentan la separación de los compuestos obtenidos después de 40 minutos de irradiación. Una observación detallada de estos cromatogramas indica que las coronas positivas son productoras de un número y una cantidad de compuestos mayor ya que para este caso se identificaron 30 especies gaseosas en total que incluyen a un anillo de tres miembros y a 6 nitrilos. El resto de las especies identificadas son hidrocarburos, en su mayoría con metil y dimetil ramificaciones y homólogos de dobles enlaces. En las coronas de polaridad negativa se identificaron menos especies: 5 nitrilos y 16 hidrocarburos, estos últimos únicamente con metil ramificaciones. Las especies producidas exclusivamente por las coronas positivas incluyen: ciclopropano, 2-metilpropeno, 2,2,-dimetilbutano, 2,2,3-trimetilbutano, 3-metilpentano, 2,2-dimetilpentano, n-hexano, n-heptano y 2-metilpropanonitrilo.

La Fig. 25 proporciona a manera de ejemplo, las gráficas de formación de los hidrocarburos lineales y de los nitrilos producidos por las coronas positivas y negativas. Las gráficas de formación del resto de los compuestos se encuentran en el apéndice C. La tendencia en el rendimiento de los productos formados por las corona positivas es aumentar uniformemente si la cantidad de energía depositada es mayor. El rendimiento de los productos de las coronas negativas en cambio, alcanza un máximo alrededor de los 2.6 kJ y pasado este valor se aprecia un marcado decremento. En general, los rendimientos de las coronas negativas son un orden de magnitud menores como puede verse en los resultados listados en la Tabla 8.

Debido a que es muy probable que las descargas eléctricas de tipo corona se desarrollen entre las nubes de metano de Titán y una vez determinado el tipo de compuestos orgánicos formados así como realizado la estimación de su producción, se realiza ahora la comparación de los

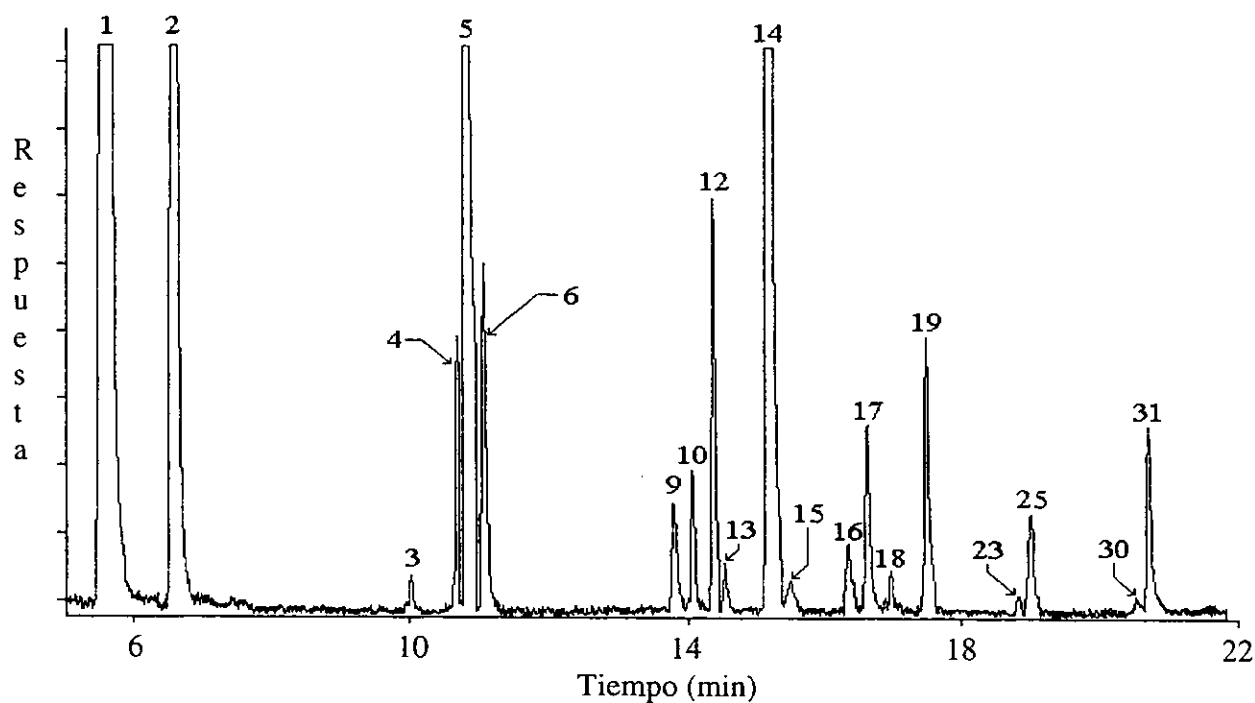
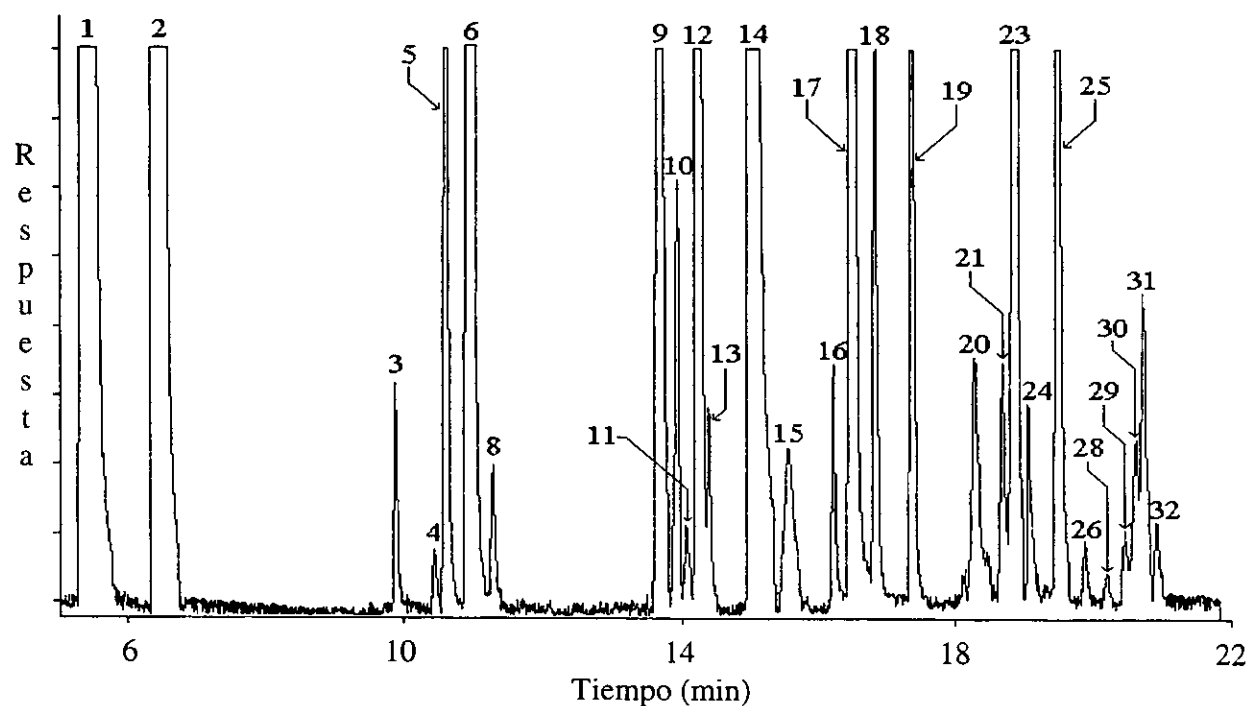


Figura 24. Separación mediante cromatografía de gases con monitoreo selectivo de los iones 26, 27, 28 y 41, de una mezcla de hidrocarburos (C_1 a C_7) y de nitrilos (C_1 a C_4) producidos por 40 minutos de irradiación con descargas corona positivas (superior) y negativas (inferior) de 670 mbar de una mezcla de N_2 (90%) y CH_4 (10%) a 298 K. Cromatograma obtenido bajo las condiciones descritas en la figura 23. La identificación de los picos corresponde a la enunciada en la figura 23.

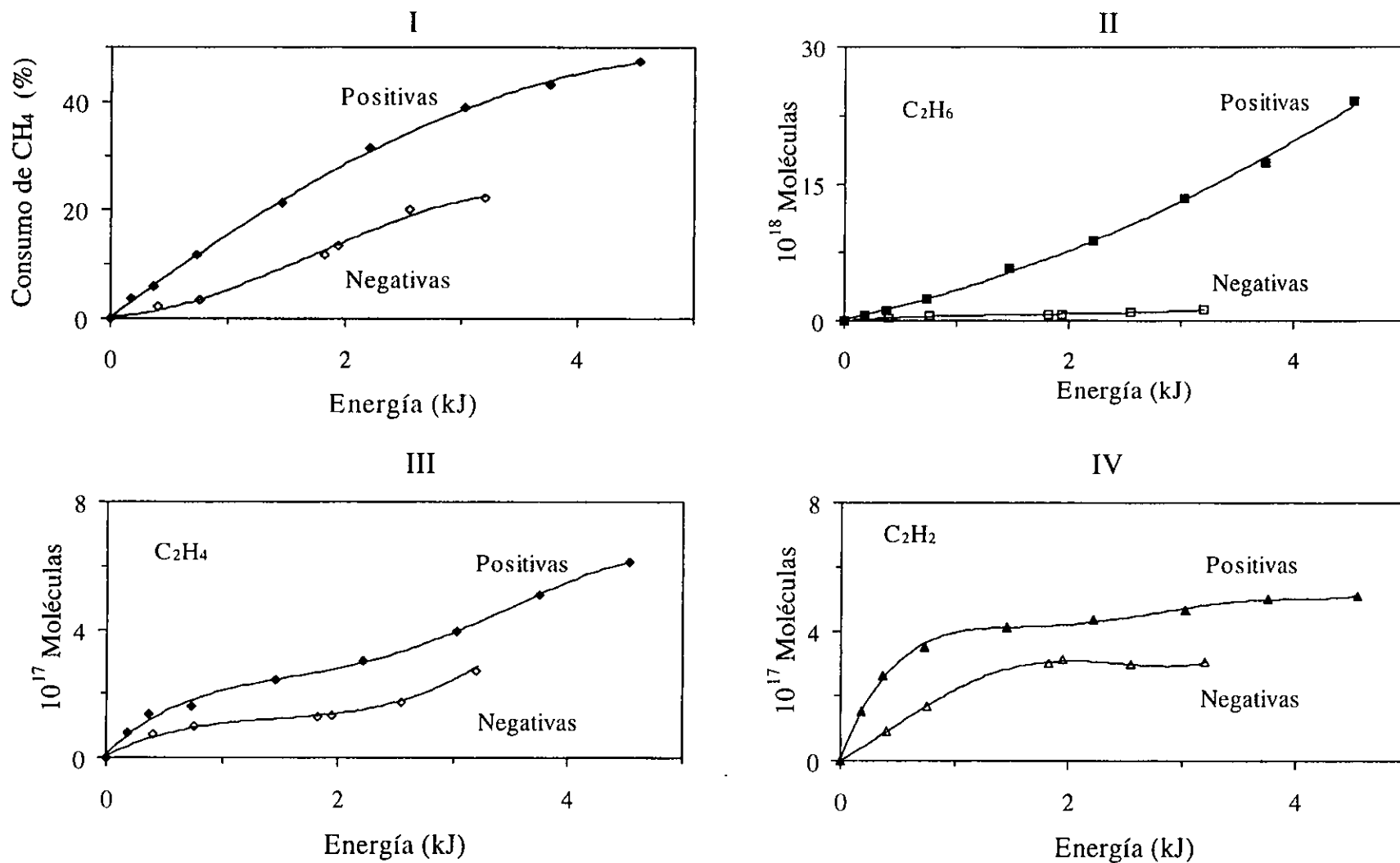


Figura 25. Dependencia de la descomposición de CH₄ (gráfica I) en porcentaje por unidad de energía disipada y rendimiento de los hidrocarburos C₂ en número de moléculas por unidad de energía disipada por coronas positivas y negativas a 670 mbar de una mezcla de N₂ (90% y CH₄ (10%) a 298 K.

hidrocarburos y nitrilos identificados con los productos resultantes de la exposición de la troposfera de Titán a otras formas de energía que pueden también estar presentes en la atmósfera baja y contribuir con la formación del mismo u otro tipo de compuestos. Estas formas de energía corresponden al plasma originado por un haz láser cuya finalidad es simular la onda de choque producida por la entrada esporádica de bólidos acelerados a la atmósfera; descargas de tipo arco, con el fin de conocer si existe alguna diferencia entre el tipo de productos formados por una descarga eléctrica que genera un plasma frío (descarga corona) y una que genera un plasma de alta temperatura (descarga de arco); y radiación gamma, para simular el efecto de la radiación cósmica en los constituyentes principales de la atmósfera baja de Titán.

Una vez realizadas las respectivas irradiaciones, cuyos detalles se describen en la sección de Desarrollo Experimental, las técnicas de separación y análisis permitieron identificar un total de 39 hidrocarburos y 7 nitrilos que se distribuyen de manera distinta entre las diferentes fuentes de energía. Las descargas corona, como ya se ha mencionado, producen preferentemente hidrocarburos saturados y ramificados junto con algunos hidrocarburos insaturados sencillos, las descargas de arco sintetizan a la mayoría de los hidrocarburos con dobles enlaces conjugados y compuestos derivados del benceno. El plasma iniciado por un haz láser forma principalmente a los alquinos y compuestos aromáticos. Los fotones gamma parecen ser un intermediario entre las descargas de arco, el plasma iniciado por un haz láser y las descargas corona produciendo un número considerable de hidrocarburos saturados así como hidrocarburos insaturados y aromáticos. Todas las fuentes de energía utilizadas resultaron ser fijadoras apropiadas de nitrógeno ya que se detectó la producción de nitrilos en todos los casos. El único nitrilo insaturado identificado es producido exclusivamente por el plasma iniciado por un haz láser y por las descargas de arco.

Otra de las diferencias que puede observarse es respecto al número de especies formadas, Las descargas de arco forman el mayor número de compuestos identificados, 17 hidrocarburos y 5 nitrilos. Las especies producidas exclusivamente por las descargas de arco incluyen al 3-penten-1-ino, 1, 3-pentadieno, ciclopentadieno, etinilbenceno y vinilbenceno. El resto de los productos son sintetizados por al menos dos diferentes fuentes energéticas.

La figura 26 contiene las gráficas de formación de las principales especies obtenidas en fase gaseosa al irradiar a la troposfera de Titán con descargas de arco, un plasma iniciado por un haz láser y radiación gamma. Las gráficas del resto de los productos se encuentran en el apéndice D.

A partir de estas gráficas puede observarse que la producción de los diferentes compuestos varía en función del tiempo de exposición.

En la Figura 27 se encuentran las gráficas de barras de los rendimientos energéticos de los hidrocarburos de dos átomos de carbono en función de la energía disipada por cada una de las diferentes fuentes de energía. La distribución, en términos generales, respecto a la formación de los hidrocarburos C_2 es etano>etino>eteno. La Figura 27 proporciona además, a manera de ejemplo, las gráficas del rendimiento energético de los hidrocarburos C_3 , de los compuestos aromáticos y de los nitrilos producidos en cada caso. Las gráficas complementarias se encuentran en el apéndice E. Los productos que reportan la formación de un mayor número de moléculas por unidad de energía son el etano (C_2H_6) en el caso de las descargas corona y los fotones gamma, el etino (C_2H_2) en el caso del plasma iniciado por un haz láser y las descargas de arco. La producción de nitrilos está dominada por el metanonitrilo (HCN) y el etanodinitrilo (C_2N_2).

Estas diferencias son indicativas de que la forma en que se producen los compuestos con cada una de las fuentes de energía debe ser diferente. En el caso de las descargas corona, el cambio en la polaridad resulta en un incremento de aproximadamente un orden de magnitud (Tabla 8) en los rendimientos energéticos de las coronas positivas. Las descargas corona dependen de dos mecanismos de propagación, el impacto electrónico y la fotoemisión. Las coronas negativas ionizan a las moléculas del gas circundante mediante impactos electrónicos. Las coronas positivas dependen más de la fotoionización para su propagación aunque recurren también a la ionización por impacto electrónico (Chang *et al.*, 1991). De manera que el efecto combinado de estos dos mecanismos permite explicar el incremento en la formación de compuestos orgánicos. En este tipo de descargas, los fotones y electrones que se emiten tienen una energía comparable a las energías de activación de las moléculas de metano y nitrógeno iniciales esto permite la formación preferencial de un solo tipo de especie excitada que resulta en la formación de compuestos de una familia química específica. La mayoría de los compuestos formados por las descargas corona (Tabla 8) pueden explicarse a partir de la formación del radical CH_3 y de los iones N^+ , CH_3^+ , CH_2^+ $HCNH^+$. Los mecanismos de formación de los hidrocarburos y nitrilos producidos pueden consultarse en Ramírez (1998). Las descargas de arco y el plasma iniciado por el haz láser se propagan también mediante impacto electrónico, pero en estos casos los procesos son mucho más energéticos que con las descargas corona. En este tipo de descargas participa también la energía térmica originada proveniente de la onda de choque del plasma originado. Esta energía produce especies químicas muy activadas que pueden fácilmente alcanzar un equilibrio termodinámico y mantenerlo. Sin embargo, dado el exceso de

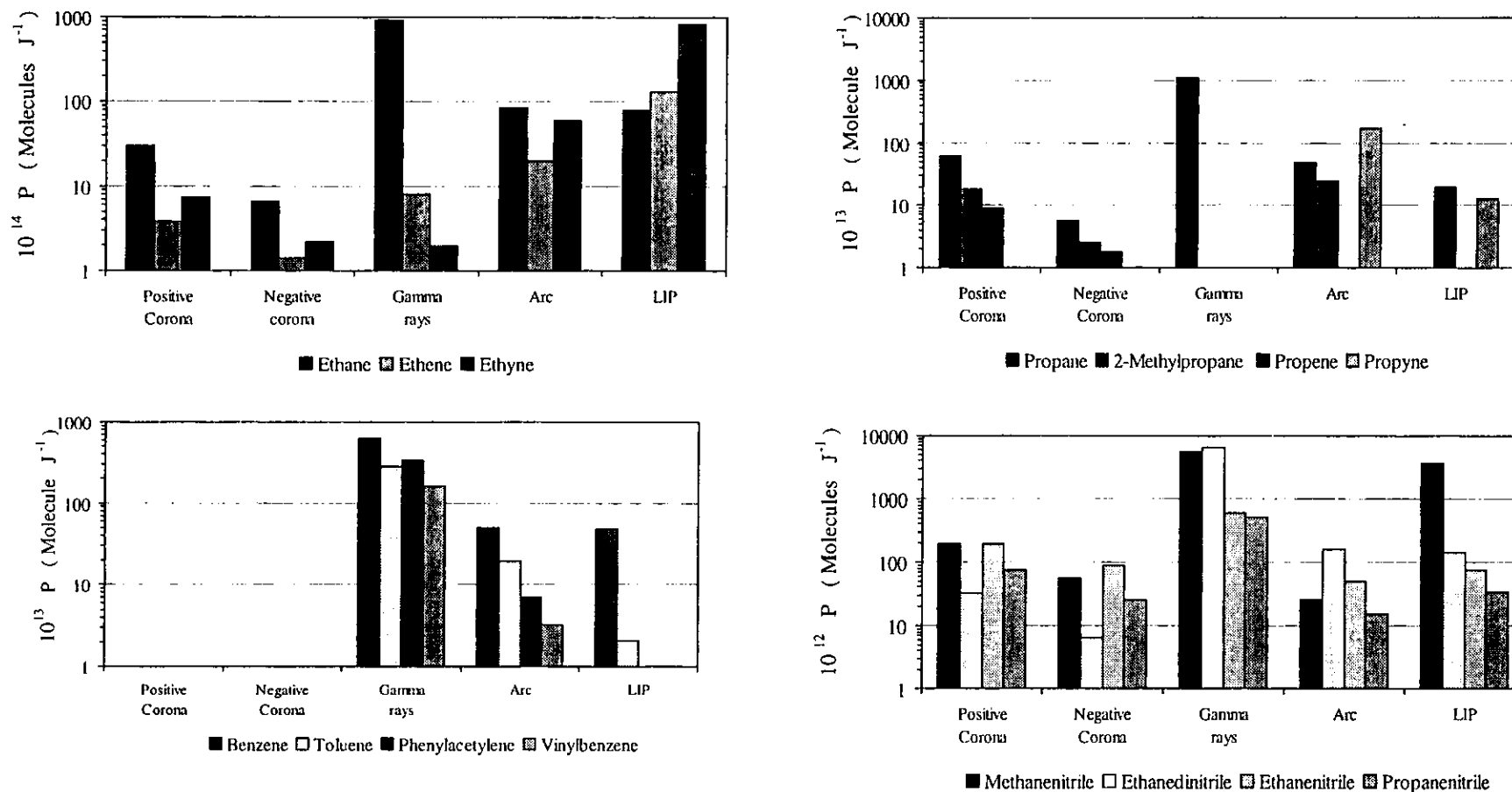


Figura 27. Rendimiento en función de la energía de los hidrocarburos C₂ y C₃ (gráficas superiores), aromáticos (inferior izquierda) y nitrilos saturados (inferior derecha). Los rendimientos están expresados en número de moléculas por unidad de energía disipada por las coronas positivas, negativas, fotones gamma, descargas de arco y plasma iniciado por un haz láser a 670 mbar de la atmósfera simulada de Titán (10% de CH₄ en N₂) a 293 K

energía disponible las reacciones producidas no son selectivas y puede producirse, a partir de una mezcla de composición sencilla, una gran variedad de compuestos. Las moléculas de metano iniciales son fraccionadas hasta radicales CH_2 y CH que facilitan la formación de un gran número de compuestos insaturados los cuales pueden continuar reaccionando con otros radicales o iones y formar a los compuestos aromáticos detectados. Las partículas gamma son un tipo de radiación ionizante cuya energía sobrepasa las energías de excitación de la mayoría de las moléculas. Por lo tanto, cada partícula tienen la capacidad de ionizar o incrementar la energía de un gran número de moléculas mediante los choques inelásticos que pueda sufrir durante todo su recorrido. Este proceso no es selectivo ya que las especies reactivas resultantes pueden presentarse en cualquiera de sus posibles estados de excitación o bien transformarlas hasta los radicales o iones más sencillos como CH . El resultado final es una mezcla indiferenciada de productos que incluye, como puede observarse en la Tabla 8, diferentes tipos de compuestos.

La formación de especies insaturadas y conjugadas como el eteno, etino, propadieno, 2-butino, 1,3-butadieno y 1,3-pentadieno, es especialmente favorecida cuando la troposfera simulada de Titán es expuesta a la acción de la descarga de arco y del plasma originado por un láser en por al menos dos ordenes de magnitud en el caso de los hidrocarburos C_2 y en el total del rendimiento para los otros hidrocarburos mencionados. Estos productos tienen una tasa de formación que depende enormemente de la temperatura (Scattergood *et al.*, 1989). A altas temperaturas, el equilibrio de las reacciones químicas ocurre lo suficientemente rápido como para mantener el equilibrio químico. Sin embargo, a una cierta temperatura conocida como temperatura de congelamiento, la velocidad de la reacción disminuye a tal grado que es imposible mantener el equilibrio y entonces los diferentes productos se congelan, es decir, permanecen en concentraciones mucho mayores que las consistentes con el equilibrio termodinámico en el caso de que la mezcla gaseosa se encontrase a temperatura ambiente. Este tipo de modelo de equilibrio se ha utilizado para explicar la producción de este tipo de compuestos altamente insaturados y conocidos como productos típicos de un plasma de alta temperatura (Chameides y Walker, 1981; Borucki y Chameides, 1984; Scattergood *et al.*, 1989).

Además de la notable producción de compuestos insaturados, en la descarga de arco y en el plasma originado por un láser, se encontró también la producción de cantidades significativas de hidrocarburos aromáticos. En base a las gráficas de producción de la Fig. 26 que demuestran que este tipo de compuesto se forma solo a altas dosis de energía, puede proponerse que la formación de estos compuestos corresponde a un proceso de transformación secundario en el que los productos iniciales forman radicales libres, un proceso sencillo dada su naturaleza química y la

Tabla 8. Rendimientos en función de la energía disipada (P) de los productos orgánicos gaseosos obtenidos por irradiación de 670 mbar de una mezcla de CH₄ (10%) y N₂ (90%) a 293 K* con un plasma iniciado por un haz láser, descargas de arco, fotones gamma y descargas corona de polaridad positiva y negativa

Compuesto	Rendimiento por unidad de energía P ($\times 10^{14}$ Molécula J ⁻¹)				
	Plasma iniciado por láser	Descarga de Arco	Radiación gamma	Coronas Positivas	Coronas Negativas
<i>Etano</i>	79	86	920	30	6.6
<i>Eteno</i>	130	20	8	3.8	1.4
<i>Etino</i>	820	60	2	7.3	2.2
<i>Propano</i>	**	4.8	110	6.2	0.57
2-Metilpropano	2	**	**	1.8	0.26
2, 2-Dimetilpropano	**	**	1.7	1.1	0.39
<i>Propino</i>	1.2	**	**	**	**
Propadieno	1.8	9.4	**	**	**
n-Butano	**	**	90	43	0.90
2-Metilbutano	**	**	6.6	2.8	0.74
Buteno	**	**		0.017	0.016
2-Metil-2-Buteno	**	**	9.4	0.19	0.11
Butino	6.5	4.1	60	**	**
2-Butino	1.9	2.0	**	**	**
1-Buten-3-ino	14	23	**	**	**
2-Metil-1-buten-3-ino	2.2	2.5	**	**	**
<i>1,3-Butadieno</i>	5.6	5	11	**	**
n-Pentano	**	**	**	0.57	0.17
2-Metilpentano	**	**	32	1.5	0.67
3,3-Dimetilpentano	**	**	**	5.2	0.50
3-Penten-1-ino	**	.059	**	**	**
1,3-Pentadieno	**	0.47	**	**	**
Ciclopentadieno	**	1.5	**	**	**
Hexano	**	***	**	0.45	**
<i>Benceno</i>	4.9	4.9	63	**	**
Tolueno	1.9	1.9	28	**	**
Fenilacetileno	**	0.70	**	**	**
Vinilbenceno	**	0.32	**	**	**

Tabla 8. (Continuación)

Compuesto	Rendimiento por unidad de energía P ($\times 10^{14}$ Molécula J ⁻¹)				
	Plasma iniciado por láser	Descarga de Arco	Radiación gamma	Coronas Positivas	Coronas Negativas
<i>Metanonitrilo</i>	36	0.26	55	1.9	0.56
<i>Etanodinitrilo</i>	1.4	1.6	66	0.38	0.064
<i>Etanonitrilo</i>	0.75	0.50	6.1	1.9	0.88
Propanonitrilo	0.33	0.15	5.0	0.77	0.26
2-Propenonitrilo	0.014	0.014	**	**	**

* Los rendimientos energéticos (P) se calcularon a partir de las gráficas de formación de cada compuesto. Los productos principales están resaltados en negrillas.

** Productos no detectados.

Los productos identificados en la atmósfera de Titán están resaltados en itálicas.

energía en exceso presente, que interactúan en reacciones del tipo Diels-Alder (Morrison, 1996) para originar a los compuestos de tipo bencénico.

Los resultados obtenidos al exponer a la troposfera simulada de Titán a la acción de la radiación gamma muestran que en este tipo de experimentos se verifica una mezcla de los procesos que ocurren en los plasma fríos (descargas corona) y en los plasmas de altas temperaturas (descarga de arco y plasma iniciado por el haz láser). Información acerca de la radiólisis gamma del metano (Freeman, 1968) indican que aproximadamente dos tercios de la energía absorbida por las moléculas de metano, se utiliza en los procesos de ionización formando CH_4^+ , CH_3^+ , CH_2^+ y el restante tercio se utiliza en la disociación de la molécula originando al radical $^1\text{CH}_2$ (metileno singulete). En el caso de la molécula de nitrógeno, el total de la energía se distribuye entre los procesos de disociación ($\text{N} + \text{N}$), excitación (N^*_2), ionización disociativa ($\text{N}^+ + \text{N} + \text{e}^-$) y ionización ($\text{N}_2^+ \text{e}^-$). Los procesos principales son el de disociación y el de ionización disociativa (Capone *et al.*, 1983). El conjunto de estas especies reactivas, principalmente los iones, forman rápidamente a precursores de hidrocarburos del tipo C_3H_5^+ , C_3H_9^+ y C_4H_9^+ entre otros (Huntress, 1977) mediante reacciones de tipo ion molécula. Después de una recombinación, estos iones originan compuestos insaturados y saturados como C_3H_4 , C_3H_8 en proporciones semejantes (Capone *et al.* 1983). La reacción de los iones de nitrógeno (N^+) con la molécula de metano, produce igualmente iones de tipo hidrocarburo además de átomos de nitrógeno neutros y sobre todo la formación del ion H_2CN^+ (Huntress, 1977) el cual es un importante precursor de la síntesis de los nitrilos superiores (Capone *et al.*,

1983). Debido a la presencia del conjunto de estas entidades reactivas, puede explicarse la variedad de productos resultante en la exposición de la troposfera de Titán a la radiación gamma.

La Tabla 8 resume el conjunto de resultados obtenidos después de la irradiación de la troposfera simulada de Titán por las formas de energía que probablemente representan los más profundos efectos en la evolución química de la atmósfera de este satélite. En primera instancia es importante destacar que los compuestos orgánicos principales detectados en la atmósfera de Titán pueden sintetizarse a partir de alguna o algunas de las formas de energía utilizadas en el presente estudio. Aún cuando la presencia de descargas eléctricas de tipo relámpago no ha sido detectada en la atmósfera del satélite, las consideraciones realizadas en el presente estudio permiten postular la ocurrencia de alguna otra forma de descargas eléctricas como las descargas corona. Los resultados derivados de la transformación química de la troposfera de Titán mediante estas descargas tiene implicaciones importantes, sobre todo en lo relativo a la síntesis de compuestos como el eteno (C_2H_4) cuya abundancia en los modelos fotoquímicos (Yung *et al.*, 1984) o en los experimentos de simulación que utilizan descargas de tipo relámpago (Borucki *et al.*, 1988), es de 10 a 40 veces menor que la abundancia detectada en la atmósfera de Titán. Estas descargas sin embargo, no explican adecuadamente la formación de todos los tipos de compuestos orgánicos detectados en Titán. Consecuentemente es importante considerar que la ocurrencia de otros procesos en la atmósfera como la química desarrollada por las partículas energéticas provenientes de la radiación cósmica o la entrada de cuerpos acelerados a la atmósfera o bien algún otro tipo de descargas eléctricas como las descargas de arco, puedan contribuir con la formación de compuestos como los hidrocarburos insaturados y aromáticos, estos últimos de gran importancia para el inventario final de los compuestos atmosféricos.

4. 2. Cálculo del índice de refracción complejo de un análogo de los aerosoles de Titán

Las gráficas de formación en fase gaseosa de los compuestos que contienen de 2 a 4 átomos de carbono (Figs. 25 y 26), muestran que estos productos alcanzan un valor máximo de formación después del cual inician la formación de compuestos mayores y más complejos. En los experimentos realizados con el plasma iniciado por un haz láser, la descarga de arco y las descargas corona, esto es particularmente evidente ya que después de un período de irradiación prolongado, se observa la formación de un sólidos amarillo-café que se deposita sobre la pared del respectivo reactor utilizado. La evolución que se observa en estas gráficas puede relacionarse con la evolución de la atmósfera de Titán. Una vez que se han sintetizado algunos hidrocarburos y nitrilos pequeños en la estratosfera por acción de la radiación ultravioleta y de las partículas

energéticas sobre el metano y el nitrógeno, su posterior transformación a cargo de procesos secundarios origina compuestos más complejos que pueden condensarse y sedimentar hacia niveles más bajos de la atmósfera por acción de la fuerza gravitacional. Estos procesos dan como resultado la formación de las partículas sólidas que constituyen a los aerosoles de Titán. Estos aerosoles forman a las dos capas de niebla que ocultan la superficie del satélite y que le confieren su particular color naranja. La capa principal de aerosoles se ubica entre los 200 y 300 km y la capa secundaria, conocida como separada, se ubica por arriba de los 500 km de altitud (Morrison *et al.*, 1986; Atreya, 1986).

Dada la dificultad que existe para realizar análisis *in situ* de estos aerosoles estratosféricos, su caracterización se ha ido constituyendo a través de las observaciones realizadas desde la Tierra o mediante sondas espaciales (Rages y Pollack, 1980; Tomasko y Smith, 1982; Neff *et al.*, 1984). La información obtenida se ha complementado con los resultados de experimentos de simulación y modelización. Los experimentos de simulación del ambiente de la atmósfera de Titán han demostrado que el material obtenido después de irradiaciones prolongadas de mezclas de metano (CH_4) en nitrógeno (N_2) con diferentes fuentes energéticas, producen depósitos de un material sólido, pegajoso de color oscuro que se ha propuesto como candidato para caracterizar a los aerosoles de Titán (Sagan y Thompson, 1984; Borucki *et al.*, 1988; Scattergood *et al.*, 1989; Thompson *et al.*, 1991; Cabane y Chassefière, 1995). Sin embargo, se han encontrado importantes diferencias en sus propiedades debido principalmente a que estas dependen fuertemente de las condiciones experimentales utilizadas para obtener tales materiales. Entre las condiciones más significativas pueden mencionarse la composición inicial de la mezcla de gases reactivos, el tiempo de irradiación y el tipo de fuente de energía utilizada, cuyas diferencias conducen a materiales sólidos formados por partículas de diferentes tamaños, forma, composición química y propiedades ópticas. La correcta caracterización de estas propiedades, especialmente las ópticas, de un análogo que represente de manera correcta a los aerosoles de Titán es crucial debido al importante papel que tienen los aerosoles en los procesos de transferencia radiativa en la atmósfera del satélite.

Dentro de las experiencias de simulación que han contribuido de manera significativa a la caracterización de un material sólido, producido en condiciones cercanas a la estratosfera de Titán, que puede considerarse como un material equivalente a los aerosoles estratosféricos se encuentran las realizadas por Coll *et al.* (1999). Sus resultados demuestran que el sólido obtenido por la irradiación de una mezcla de 2% de CH_4 en N_2 con una descarga luminosa es un material de apariencia semi-líquida y color café oscuro, formado por partículas esféricas de $0.3 \mu\text{m}$ de

diámetro en promedio, de carácter polar ya que es solubilizado por metanol, etanol y acetonitrilo y que contiene a los grupos químicos $C=C$, $C-H$ y $C \equiv N$ correspondientes a hidrocarburos y nitrilos. La estimación cualitativa del índice de refracción complejo de este material, demostró una diferencia significativa respecto al índice de refracción complejo reportado por Khare *et al.* en 1984. Con la idea de avanzar en la completa caracterización de este material y conocer el o los motivos de la diferencia encontrada, la parte final de este trabajo consiste en el cálculo de los parámetros del índice de refracción complejo de películas delgadas de un material análogo a los aerosoles del satélite, obtenido después de la irradiación con una descarga luminosa de una mezcla que simula a la estratosfera de Titán.

Un análisis de las condiciones en las que se sintetizaron los "tholins" del grupo de Khare y de la forma en que fueron calculados los valores de n y k demuestran la comisión de varios errores experimentales como el uso de una mezcla gaseosa con un alto contenido de metano, que no corresponde con el contenido de este constituyente gaseoso en la estratosfera; la irradiación en exceso del producto sólido, ya que el sistema utilizado es un sistema estacionario sometido a casi 90 horas de irradiación; una determinación ambigua del espesor de la película depositada sobre las placas ópticas que resulta en un intervalo muy amplio; el uso de una gran diversidad de técnicas para la medición de las constantes ópticas; entre otras.

En el presente trabajo, uno de los principales objetivos comprende la síntesis de análogos apropiados de los aerosoles presentes en la estratosfera de Titán. Las condiciones experimentales utilizadas son representativas del ambiente de la estratosfera del satélite: una mezcla gaseosa de 2% de metano en nitrógeno es irradiada por una descarga luminosa a una presión de 1 mbar durante algunos segundos. La formación de los aerosoles se inicia mediante reacciones de impacto electrónico, que es el mecanismo de transformación dominante que opera en la estratosfera de Titán. Los fotones producidos por la descarga, también participan en el proceso de transformación. El sólido orgánico producido después de al menos dos horas de irradiación se deposita, como una película amarilla traslúcida, sobre placas de cuarzo. Los análogos de los aerosoles sintetizados se observaron con ayuda de un microscopio confocal. Las imágenes registradas (recuadro Fig. 15) muestran la heterogeneidad en la densidad de las muestras, su apariencia rugosa y la no uniformidad de su espesor. Estas características hacen suponer que cambios en la porosidad y en el espesor de las películas pueden resultar en cambios en el valor del índice de refracción complejo.

El protocolo experimental desarrolla en el Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques (LISA) de la Universidad de París 12, permite la recuperación de las muestras en condiciones que evitan su contaminación con los gases de la atmósfera terrestre, como el oxígeno, el monóxido y bióxido de carbono y el vapor de agua. Para verificar que estos gases atmosféricos no se incorporan a las muestras de los análogos de aerosoles, una de ellas se sometió a un análisis de composición elemental. El resultado demuestra el contenido de 1 átomo de oxígeno por cada 150 átomos de carbono, hidrógeno y nitrógeno presentes. Este valor se considera como no significativo, especialmente al compararlo con síntesis de los aerosoles de Titán anteriormente reportadas, por ejemplo McKay (1996) encuentra 1 átomo de oxígeno por cada 15 átomos de carbono, hidrógeno y nitrógeno presentes en sus muestras. En el experimento de simulación realizado por Khare *et al.* (1984) no consideran este tipo de contaminación. La incorporación de los gases atmosféricos terrestres hacia los análogos de los aerosoles, ocurre en los minutos posteriores al término de la irradiación con la descarga luminosa. Inmediatamente después de que cesa la acción de la descarga, algunos átomos y moléculas conservan energía suficiente para continuar participando en reacciones de transformación. Si las muestras son expuestas a la atmósfera terrestre, estas entidades pueden reaccionar con sus constituyentes y fácilmente incorporarlos. Para evitar este tipo de contaminación, las muestras permanecen en el interior del reactor durante al menos 30 minutos después de detenida la descarga luminosa, tiempo en el cual las paredes del reactor han igualado la temperatura ambiente y se ha disipado la energía remanente.

El otro inconveniente importante en la síntesis de un material análogo a los aerosoles es la irradiación excesiva de las muestras ya que tradicionalmente la síntesis se desarrolla en un sistema cerrado durante varias horas o días de exposición a la fuente de energía. Como se explica en la sección de Desarrollo Experimental, los análogos de aerosoles del presente estudio, fueron sintetizados en un sistema de flujo continuo en el que la estratosfera simulada fluye constantemente por el interior del reactor. Esto provoca que reciba la acción de la descarga luminosa solamente durante 7 segundos y que la síntesis de los aerosoles ocurra todo el tiempo sobre una mezcla gaseosa no irradiada.

Las diferencias entre la densidad y el grosor de las muestras sintetizadas fueron las principales directrices para elegir las técnicas ópticas y los métodos más apropiados para determinar correctamente los valores de los parámetros del índice de refracción. Se decidió por lo tanto realizar mediciones de la transmitancia y de la reflectancia exhibidas por las muestras entre los 200 y los 900 nm y resolver on estos valores las ecuaciones de Abelès (Apéndice A) para

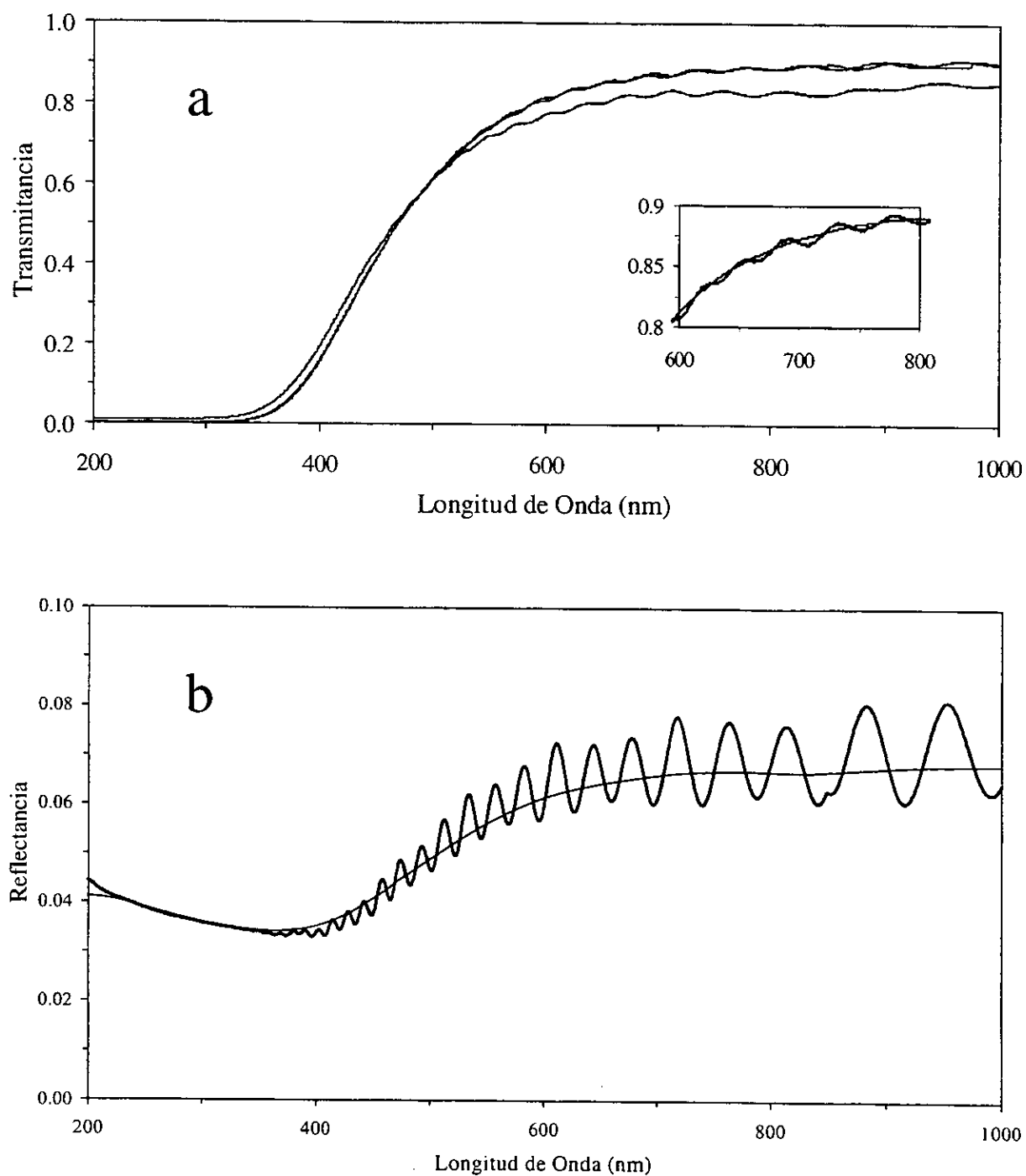


Figura 28. Valores de transmitancia (a) y reflectancia (b) en función de la longitud de onda de los análogos de aerosoles de Titán producidos después de 4 horas de irradiación de una mezcla de 2% de CH_4 en N_2 con una descarga luminosa. La Fig. 28a muestra las gráficas de dos muestras de 4 horas de irradiación diferentes. En el recuadro de la misma figura se observa la gráfica resultante después de eliminar el efecto coherente.

determinar los valores del índice de refracción (n) y del coeficiente de extinción (k), una vez conocido el grosor de las muestras.

Las gráficas de transmitancia y reflectancia de dos muestras de 4 horas de irradiación y una muestra de 2 horas de irradiación se muestran en la Fig. 28. A partir de la forma de las gráficas de transmitancia puede observarse que los análogos de los aerosoles sintetizados presentan características ópticas similares a las observadas en los aerosoles de Titán (Rages y Pollack, 1980; Neff *et al.*, 1984), absorbiendo casi la totalidad de la radiación en la región del ultravioleta e incrementando se transparencia hacia longitudes de onda superiores. La gráfica superior (a) de la Fig. 28, ejemplifica la reproducibilidad del protocolo experimental debido a la marcada semejanza de los valores de transmitancia de dos muestras diferentes producidas, bajo las mismas condiciones experimentales, después de 4 horas de irradiación. Este característica no se había observado en experimentos de simulación anteriores (McKay, 1996). Por lo tanto la reproducibilidad lograda por el arreglo experimental utilizado en el presente estudio es notable.

Tanto en las gráficas de transmitancia (recuadro Fig. 28a) como en las de reflectancia, pueden apreciarse oscilaciones en las curvas. Estas oscilaciones son el resultado de la difracción que experimenta la radiación incidente dentro de la muestra y representan el producto del índice de refracción por el espesor de la película, $n \times d$. El espesor de las películas depositadas sobre las placas de cuarzo después de 2 y 4 horas de irradiación puede estimarse a partir del plano XZ de las microfotografías, como la que se muestra en la Fig. 15. Los valores de espesor determinados para las muestras de 2 y 4 horas de irradiación corresponden a $3 \pm 1 \mu\text{m}$ y $4 \pm 1 \mu\text{m}$, respectivamente. Estos valores, calculado directamente, son una mejor determinación del espesor de la película que las aproximaciones realizadas por métodos matemáticos en estudios anteriores (Khare *et al.*, 1984). La precisión del espesor de la película de los análogos de aerosoles se mejoró comparando la determinación instrumental con el espesor derivado de un calculo iterativo del sistema de ecuaciones simplificado de Abelès (Apéndice A). El programa computacional Film Wizard (SCI) considera el valor determinado a partir de las microfotografías confocales como una primera aproximación, supone además que una película delgada del material esta depositada sobre un material no absorbente e inicia el cálculo de los parámetros n , k y d hasta que alcanza un ajuste del 95% y proporciona el valor del espesor de la película con una aproximación del 99%. De esta manera se precisaron los espesores para las muestras de 2 y 4 horas de irradiación en $2.85 \mu\text{m}$ y $4.95 \mu\text{m}$, respectivamente.

Conociendo el valor del grosor de la película, es posible estimar el valor del índice de refracción (n) a partir del valor máximo de las oscilaciones presentadas por los espectros de transmitancia y de reflectancia. Sin embargo, las muestras sintetizadas presentan la particularidad de que las oscilaciones del espectro de transmitancia no corresponden con las oscilaciones del espectro de reflectancia. Esto puede ser una consecuencia de la diferencia de densidad y espesor existentes en una misma muestra, que resulta ser más evidente si se considera que el área muestreada para realizar las mediciones de transmitancia y reflectancia, es ligeramente diferente. Por lo tanto solamente es posible realizar una aproximación del producto $n \times d$. Para eliminar esta incompatibilidad y estar en condiciones de calcular el valor del índice de refracción, dado que el espesor de la muestra estaba ya determinado, se aplicó un tratamiento matemático (Grigorovici *et al.*, 1982; Swanepoel, 1984; Demichelis *et al.*, 1987) a las curvas de transmitancia y reflectancia que suprime el efecto coherente resultando en curvas incoherentes como las mostradas en la Fig. 28. Los valores de los parámetros del índice de refracción complejo, n y k , se calculan ajustando la terna de valores (n , k , d) en el intervalo de 200 a 900 nm con un intervalo de 1 nm utilizando el programa Film Wizard y las gráficas de transmitancia y reflectancia incoherentes. Esta forma de calcular n y k representa un considerable avance respecto al método utilizado por Khare *et al.* (1984), quienes calculan los valores del coeficiente de extinción (k) a través de una extrapolación, por el método de Kramers-Kronig, de cinco determinaciones experimentales del índice de refracción (n).

La Figura 29 presenta la variación espectral de los valores de n y k para las muestras de 2 y 4 horas de irradiación. Cualitativamente estos valores parecen ser cantidades relacionadas por causalidad a través de la relación de Kramers-Kronig, es decir, el índice de refracción (n) decrece, hacia la región del infrarrojo, con un punto de inflexión ubicado en una longitud de onda en la que el coeficiente de extinción (k) exhibe un máximo. Dado que la diferencia principal entre estas muestras consiste en el valor de espesor de la película respectiva, ambas deberían de presentar valores similares de n y k . Esto se verifica relativamente bien en los valores de n como se aprecia en la Fig. 29a. Sin embargo, los valores de k presentan diferencias más perceptibles al variar el valor del grosor. El valor máximo del coeficiente de extinción, 0.048, para la muestra correspondiente a dos horas de irradiación se localiza a 325 nm, mientras que el valor correspondiente a la muestra de 4 horas de irradiación, 0.041, se localiza a 300 nm. Estas discrepancias pueden provenir de diferencias en la composición química de las muestras, de diferencias en su morfología, del efecto de la precisión en la determinación del grosor de la respectiva película o de algún otro efecto involucrado con la determinación de la transmitancia y reflectancia. La reproducibilidad obtenida en las gráficas de transmitancia de la Fig. 28 para dos

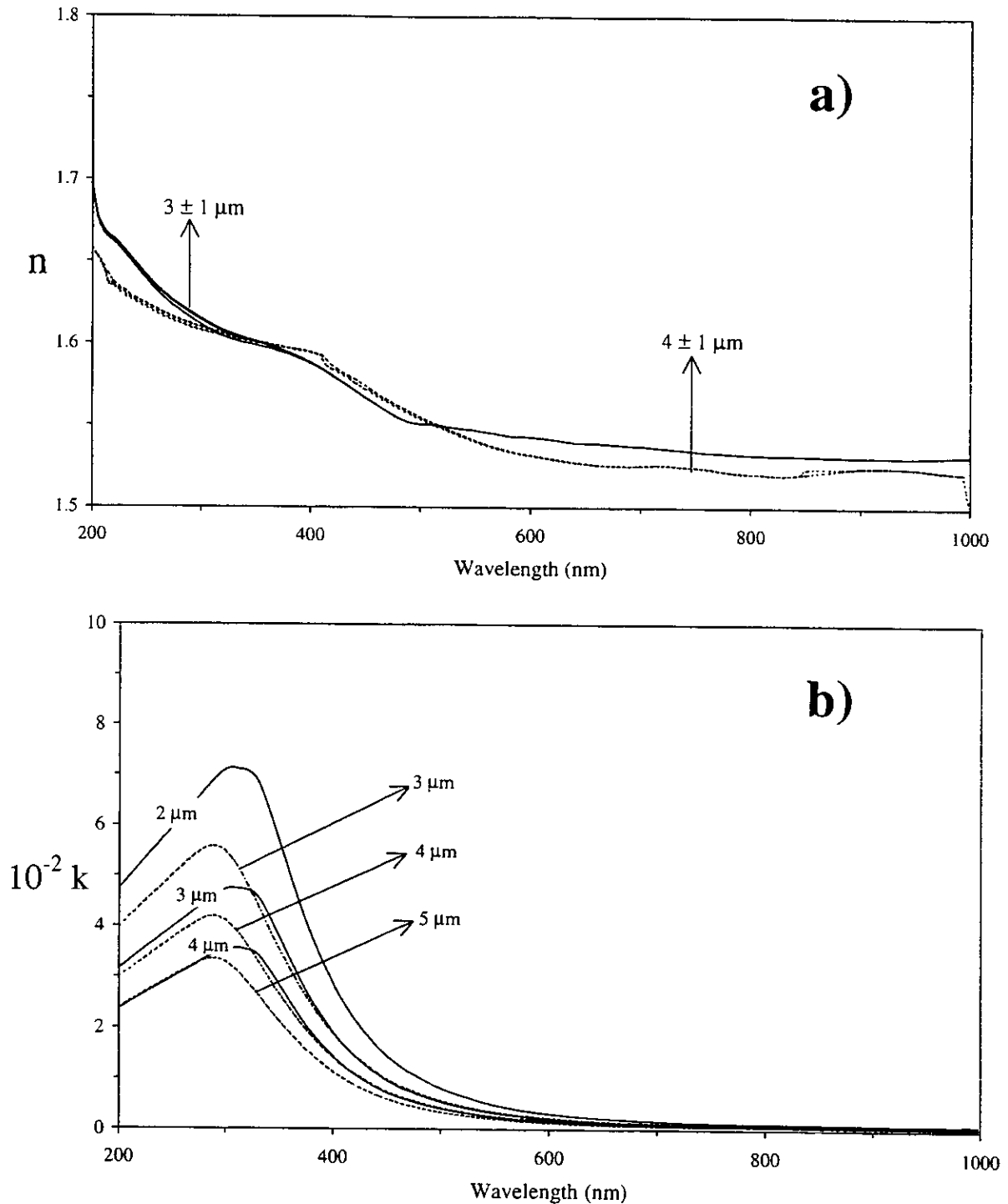


Figura 29. Influencia del espesor de película en la evolución del índice de refracción (Superior) y del coeficiente de extinción (inferior) en función de la longitud de onda. Las curvas en líneas sólidas (—) corresponden a la muestra obtenida después de dos horas de irradiación, las curvas en líneas discontinuas (- - -) corresponde a la muestra de 4 horas de irradiación.

muestras diferentes, eliminan la validez del último argumento. Por otro lado, la apariencia granular y las diferencias de grosor exhibidas por las películas de los análogos de los aerosoles, parámetros directamente relacionados con su morfología, llevan a considerar que la influencia del grosor, el grado de porosidad y la cantidad de luz difundida por las muestras pueden explicar las discrepancias en los valores del índice de refracción complejo de los análogos de aerosoles sintetizados.

El cálculo de n y k se realizó con el valor medio del grosor y con sus valores extremos, tal como se muestra en la Fig. 29. Los valores del índice de refracción no resultan muy afectados (Fig. 29a) al cambiar el grosor de la muestra. Por otro lado, el valor máximo de k disminuye en aproximadamente un 50% al aumentar en $2 \mu\text{m}$ el grosor de la película (Fig. 29b). Estos resultados son consecuencia de la dependencia cualitativa de los valores de reflectancia (R) y transmitancia (T) con respecto a n , k y d , de acuerdo al tratamiento óptico incoherente aplicado.

Los valores de transmitancia (T) mantienen una relación inversa con el espesor como puede visualizarse en:

$$T = T_0^2 e^{-k \times d}$$

T = transmitancia

T_0 = transmitancia máxima

$k = (\alpha \lambda) / (4 \pi)$

d = espesor de la película

Por lo tanto, para una muestra particular que exhibe valores de T determinados, los cambios que puedan presentarse en d necesariamente se compensan con un cambio contrario en k de manera que el producto $k \times d$ se mantenga constante. Por otro lado, los valores de reflectancia se definen de acuerdo a la siguiente función:

$$R = [(n - 1)^2 + k^2] / [(n + 1)^2 + k^2]$$

Considerando que los valores de k son dos ordenes de magnitud menores respecto a los valores de n , la ecuación anterior puede simplificarse a:

$$R = [(n - 1) / (n + 1)]^2$$

consecuentemente, los cambios que se produzcan en k , debido a diferencias en el espesor de la muestra, no afectan de manera importante a los valores de n . En las gráficas del índice de refracción (n) para diferentes espesores se observa una disminución monótonica de 1.65 a 1.52 en el intervalo de longitud de onda estudiado.

Los valores de reflectancia se miden a partir de la primera desviación que sufre el haz de radiación al incidir con la muestra. Es por esta razón que su valor no es afectado de manera significativa por el espesor y aparece como constante. Los valores de transmitancia se registran después de que el haz de radiación ha viajado por el interior de la muestra sufriendo múltiples difracciones por lo que pequeñas diferencias en el espesor, afectan directamente el valor de la transmitancia y consecuentemente los valores de k .

La naturaleza porosa de las película de los análogos de los aerosoles depositados sobre las placas de cuarzo fue reconocida a partir de las microfotografías obtenidas con el microscopio confocal como se muestra en la Figura 15. Coll *et al.* (1997) habían ya evidenciado la naturaleza porosa de los análogos de aerosoles al observar algunas muestras bajo el microscopio de barrido electrónico. Con estos antecedentes se decidió estudiar la influencia de la porosidad en los valores del índice de refracción complejo de los análogos sintetizados en este estudio. La porosidad se entiende como el contenido de aire en la muestra por unidad de área y su variación se determinó observando diferentes regiones de la muestra. El cálculo de n y k se realizó en el intervalo de porosidad de 0% a 50% utilizando el modelo computacional Maxwell Garnett. Los resultados se listan en la Tabla 9. Los valores unitarios corresponden al máximo de las curvas de n y k de una muestra homogénea de 3 μm de espesor. El cociente de estos valores y el valor máximo calculado para la muestra cuando aumenta el contenido de aire, determina el resto de los valores de n y k . De acuerdo a los valores de la Tabla 9 se observa que un aumento en el contenido de aire tiene una mayor influencia sobre el coeficiente de extinción (k) que sobre el índice de refracción (n), por ejemplo, para un 30% de aire en la muestra, se observa un aumento del 41% en el valor máximo de k y solo un 14% de incremento en el valor máximo de n . La evolución de los valores de n y k al aumentar la porosidad es uniforme, un porcentaje de aire mayor significa todo el tiempo un incremento en los valores tanto del índice de refracción como del coeficiente de extinción. Este comportamiento se atribuye principalmente a la difusión de la radiación cuando atraviesa la muestra, que es cada vez más importante al encontrarse con un medio menos homogéneo.

Tabla 9. Valores máximos del índice de refracción (n) y coeficiente de extinción (k) de los análogos de los aerosoles de la estratosfera de Titán en función de la porosidad*

Contenido de aire, p	0	0.1	0.3	0.5
Índice de refracción, n	1.000	1.038	1.144	1.370
Coefficiente de extinción, k	1.000	1.111	1.408	2.163

* Valores están normalizados a 1 para $p = 0$

Los cálculos del índice de refracción complejo presentados en las secciones anteriores, fueron calculados a partir de mediciones realizadas en modo especular. Como se comenta en la sección 3. 6. 3 del capítulo de Desarrollo Experimental la cantidad de luz difundida por los análogos sintetizados debe considerarse para los cálculos de los parámetros del índice de refracción complejo. Las mediciones realizadas en el modo especular estiman valores de transmitancia y reflectancia inferiores a los valores determinados cuando se utiliza la esfera integrante. Esto conduce, como puede observarse en las gráficas de la Fig. 30, a una desestimación de los valores de n y k.

Los resultados demuestran que los valores del índice de refracción (n), aunque diferentes, no son severamente afectados (Fig. 30a). En general exhiben un incremento relativo de aproximadamente el 5% en todo el intervalo de longitud de onda estudiado. La Figura 30b muestra, por otro lado, que los valores del coeficiente de extinción, aumentan aproximadamente el doble de su valor original cuando se mide el total de la radiación. Se nota además, un desplazamiento de 300 nm a 350 nm del punto máximo de la curva. El efecto de incremento se mantiene constante en el intervalo de los 200 a los 900 nm, aún cuando en la gráfica parece que este efecto se desvanece hacia las longitudes de onda del infrarrojo.

Para sintetizar los efectos de los diferentes parámetros estudiados sobre los valores finales del índice de refracción complejo, los valores promedio de n y k, calculados a partir de las mediciones realizadas utilizando la esfera integrante, se grafican en la Fig. 31 junto con la incertidumbre originada por la diferencia en las mediciones del grosor de la película y la cantidad de luz difundida. Estos valores se comparan, en la misma figura, con los resultados de la única determinación similar existente en la literatura (Khare *et al.*, 1984) y se enlistan en la Tabla 10 del apéndice F. Hay que recordar que el efecto de la porosidad implica aplicar el factor multiplicativo correspondiente a estos valores. Todas estas consideraciones no modifican sin embargo, la forma de las curvas obtenidas, las cuales difieren considerablemente de las curvas

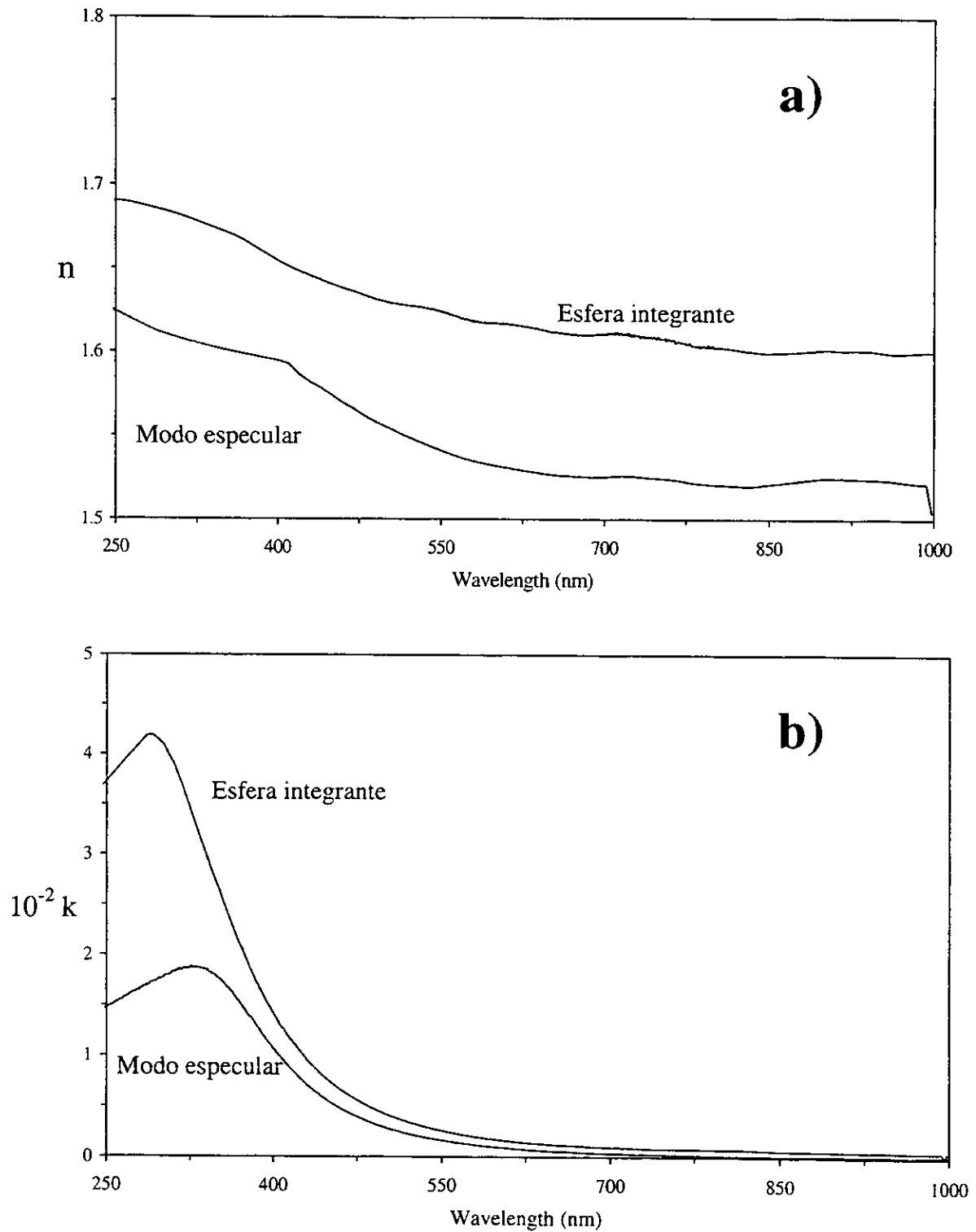


Figura 30. Efecto de la cantidad de luz difundida en la evolución del índice de refracción (n) y del coeficiente de extinción (k) en función de la longitud de onda para una muestra de 4 horas de irradiación.

reportadas por Khare *et al.* (1984), ambos conjuntos de resultados son muy diferentes. Las variaciones en el índice de refracción (n) encontradas son menos contrastantes y más débiles que las que presenta la curva de Khare y colaboradores en el mismo intervalo de longitudes de onda. La ausencia de la estructura entre 300-400 nm en los resultados del presente trabajo es evidente, además de una disminución monotónica de la curva de la región del ultravioleta a la región del infrarrojo. En lo que respecta a los valores de k , la tendencia general es muy cercana y las principales diferencias consisten en la presencia de un máximo alrededor de los 300 nm en la curva resultante del presente trabajo que no aparece en los resultados de Khare *et al.* (1984) y el hecho de que en general los valores de k son un orden de magnitud menores. Estas diferencias no son sorprendes y eran de alguna manera esperadas. La síntesis de los análogos de aerosoles del presente trabajo se realizó en condiciones mucho más óptimas. La composición de la mezcla gaseosa inicial respeta el contenido de metano de la estratosfera de Titán, las muestras sintetizadas no han sufrido de irradiación excesiva ya que la estratosfera simulada recibe la acción de la descarga luminosa solamente durante 7 segundos, que es el tiempo que dura su recorrido por el interior del reactor. Además, se ha evitado la contaminación de las muestras con oxígeno, monóxido y bióxido de carbono, así como vapor de agua ambientales. La determinación del espesor de la película depositada es mucho más precisa y los valores de los parámetros del índice de refracción complejo presentes fueron calculados directamente de los valores de transmitancia y reflectancia exhibidos por las muestras y no utilizando un método matemático. Las diferencias encontradas son igualmente un indicativo de que un trabajo mas exhaustivo de parametrización del índice de refracción complejo es necesario.

Constantemente se deriva información acerca de la atmósfera de Titán y de su superficie a partir de observaciones directas o desde la Tierra. Para explicar satisfactoriamente estas observaciones, los modelos involucrados requieren de información que proviene en la mayoría de los casos de simulaciones experimentales. Los resultados presentados deben de ser considerados como una nueva referencia para aquellos que estudian la dinámica de la atmósfera de Titán o que intentan explicar las características de la superficie. Taylor y Cousténis (1998) han reconocido que las constantes ópticas utilizadas en los estudios de transferencia radiativa relacionados con los aerosoles de Titán, tienen que ser los típicos valores de la simulación experimental de hace 16 años, simplemente por que no hay alguna otra información disponible. De manera que los presentes resultados serán de crucial importancia para explicar el albedo geométrico de Titán, específicamente su apariencia extrañamente plana en la región del ultravioleta y contribuirán también en la interpretación de la información colectada por los diferentes instrumentos

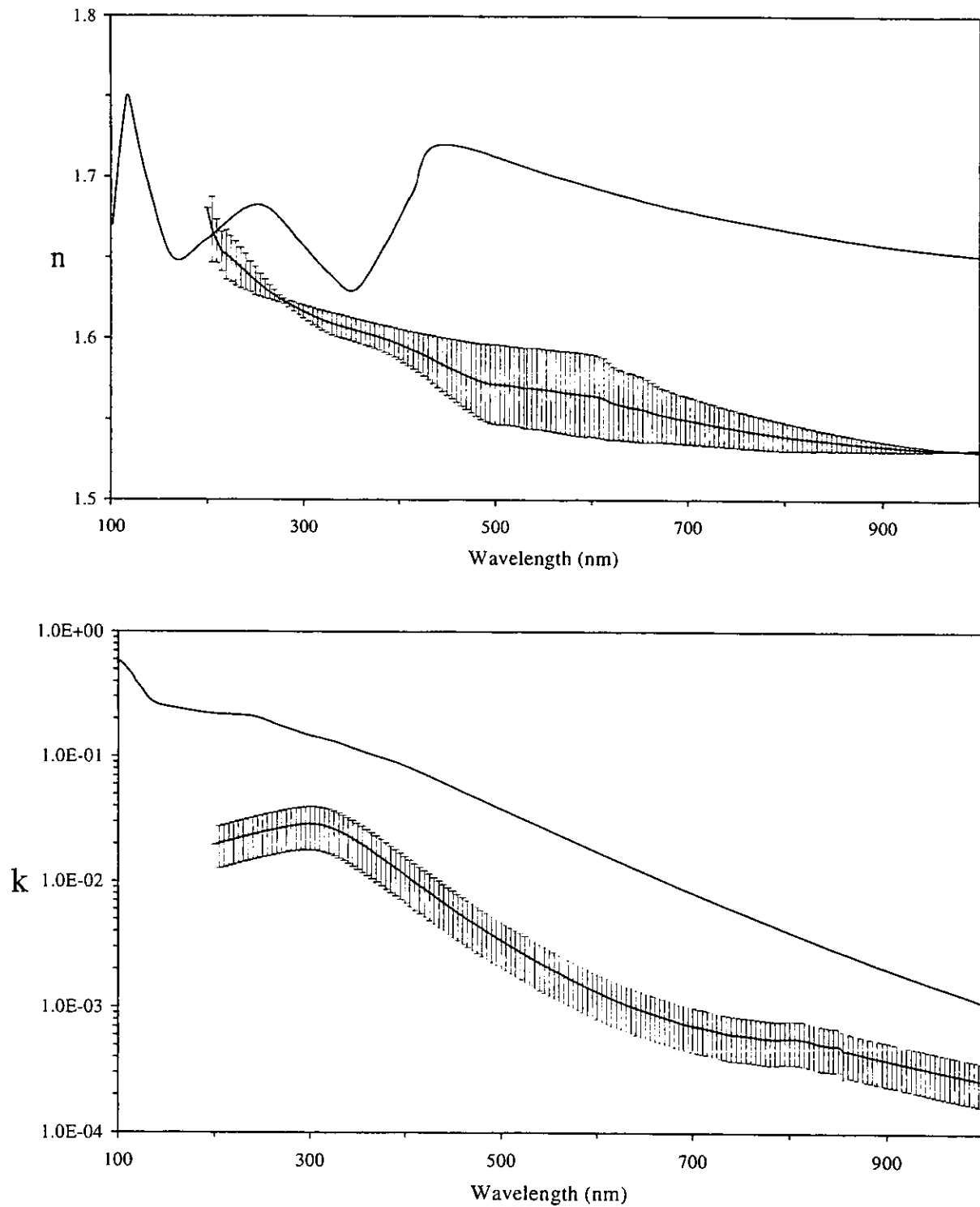


Figura 31. Valores finales de los parámetros del índice de refracción complejo de los análogos de los aerosoles de Titán. Las barras de error incluyen el efecto de las diferencias en el espesor de la película y de la luz difundida por las muestras. Las curvas sin barras de error corresponden a los valores de Khare et al (1984).

científicos a bordo de la nave Cassini-Huygens como el CIRS, DIRS VIMS etc, los cuales realizaran el análisis de diferentes regiones de la atmósfera y superficie de Titán.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la transformación de la troposfera simulada de Titán con diferentes formas de energía permiten establecer las siguientes conclusiones:

- Es posible postular el desarrollo de descargas eléctricas entre las nubes de metano presentes en la troposfera de Titán. Dado que las descargas de tipo relámpago no han sido detectadas, es muy probable que la energía de la atmósfera baja se disipe mediante descargas de tipo corona intranube, internube y nube-superficie.
- Se ha demostrado que puede producirse una variedad de compuestos orgánicos en fase gaseosa debido a la conversión de los constituyentes de una troposfera simulada de Titán en moléculas más complejas por acción de descargas corona.
- La dinámica de la atmósfera baja de Titán permite postular otras formas de energía que actúen en su transformación química. En el presente trabajo se identificaron a los compuestos orgánicos producidos por la acción de descargas de arco, del plasma y la onda de choque originada por la entrada de bólidos acelerados a la atmósfera y por la radiación ionizante.
- Se encontró que todas las formas de energía utilizadas son mecanismos eficientes de fijación abiótica del nitrógeno molecular, ya que en todos los casos se detectó la formación de nitrilos, en especial de HCN y CH₃CN. El único nitrilo insaturado (C₂H₃CN) detectado, es producido exclusivamente por el plasma originado por un haz láser y la descarga de arco.
- Respecto a la síntesis de los hidrocarburos, se detectaron diferencias en la forma en que este tipo de compuestos se sintetizan. Las descargas corona producen principalmente hidrocarburos y nitrilos saturados. El cambio en la polaridad de las descargas corona demostró que hay una formación preferente de compuestos ramificados por parte de las coronas positivas. Las descargas de arco producen hidrocarburos con dobles enlaces conjugados y

compuestos derivados del benceno. El plasma iniciado por un haz láser produce principalmente alquinos y compuestos aromáticos. La radiación gamma es un caso intermedio ya que produce tanto hidrocarburos saturados e insaturados, como compuestos aromáticos.

- Todos los principales compuestos detectados en la atmósfera de Titán son producidos por una o varias de las fuentes energéticas utilizadas en el presente estudio. Este hecho las ubica como mecanismos adecuados de transformación de los constituyentes principales de la atmósfera baja de Titán.
- La producción de eteno por parte de las descargas corona y la posterior difusión de este compuesto hacia la estratosfera, demuestran su eficiencia como una fuente abastecedora que compensa las bajas abundancias reportadas por experimentos de simulación fotoquímica o con partículas de alta energía.

Los resultados correspondientes al cálculo del índice de refracción complejo de un material análogo a los aerosoles de la estratosfera de Titán permiten concluir que:

- Se sintetizó, en condiciones experimentales bien controladas y reproducibles, un material sólido que representa apropiadamente a los aerosoles estratósfericos, libre de contaminación con gases atmosféricos terrestres.
- Los espectros de transmitancia y reflectancia de películas de los análogos de aerosoles en el intervalo de 200 a 900 nm, así como un análisis de sus características morfológicas permitieron determinar los valores de los parámetros del índice de refracción complejo.
- Se estudió la influencia de diferencias en el grosor de la película, cantidad de radiación difundida y porosidad en los valores finales del índice de refracción (n) y del coeficiente de extinción (k). Esto permitió establecer un intervalo de variación.
- Los valores finales del índice de refracción complejo, con sus incertidumbres, se presentan como una nueva referencia para explicar la dinámica de la atmósfera de Titán así como las características de su superficie. De igual manera, ayudarán a la interpretación de la información colectada por los instrumentos científicos a bordo de la misión Cassini-Huygens cuando sobrevuele a Titán en el año 2004.

APENDICE A

Fórmulas de Abelès (1967) utilizadas para calcular los valores del índice de refracción (n) y del coeficiente de extinción (k) con base a las curvas incoherentes de transmitancia y reflectancia obtenidas en el intervalo de 200 a 900 nm.

$$R = [a.b.d^{2k\eta} + a.c.d^{-2k\eta} + 2.r.\cos(2.n.\eta) + 2.s.\sin(2.n.\eta)] / D$$

$$T = [16.n_o.n_s(n^2 + k^2)] / D$$

en donde:

$$D = b.e.d^{2k\eta} + a.c.d^{-2k\eta} + 2.t.\cos(2.n.\eta) + 2.u.\sin(2.n.\eta)$$

$$a = (n - n_o)^2 + k^2$$

$$b = (n + n_s)^2 + k^2$$

$$c = (n - n_s)^2 + k^2$$

$$e = (n + n_o)^2 + k^2$$

$$r = (n_o^2 + n_s^2)(n^2 + k^2) - n_o^2 n_s^2 - 4n_o n_s k^2 - (n^2 + k^2)^2$$

$$t = (n_o^2 + n_s^2)(n^2 + k^2) - n_o^2 n_s^2 + 4n_o n_s k^2 - (n^2 + k^2)^2$$

$$s = 2.k.(n_s - n_o)(n^2 + k^2 + n_o n_s)$$

$$u = 2.k.(n_s + n_o)(n^2 + k^2 - n_o n_s)$$

$$\eta = 2.\pi.d/\lambda$$

APENDICE B

Espectros de masas e infrarrojo de los hidrocarburos y nitrilos producidos por irradiación de una troposfera simulada de Titán.

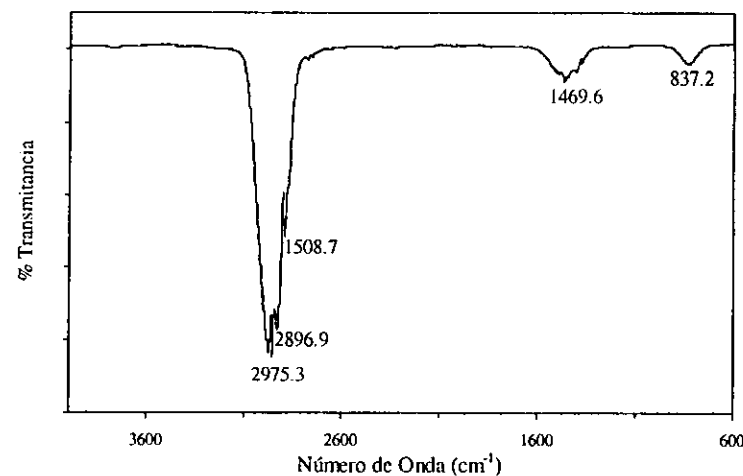
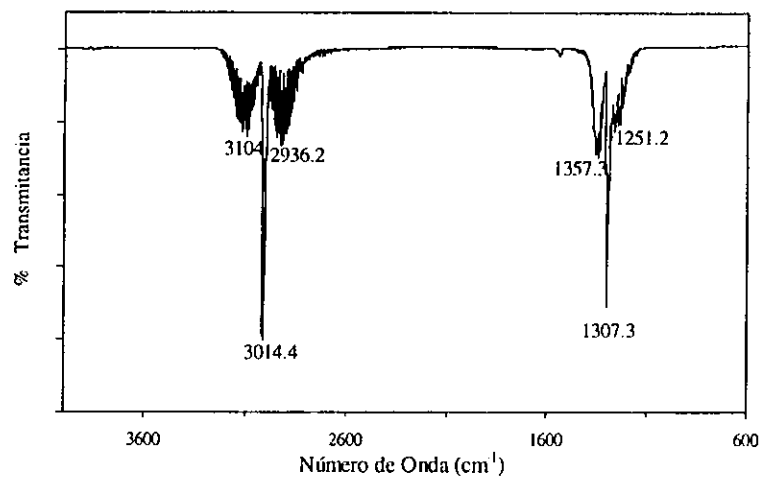
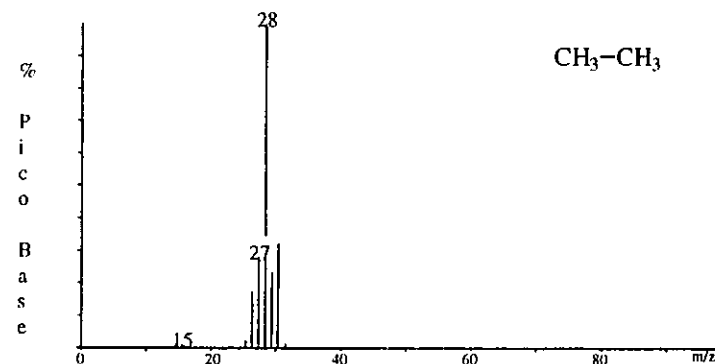
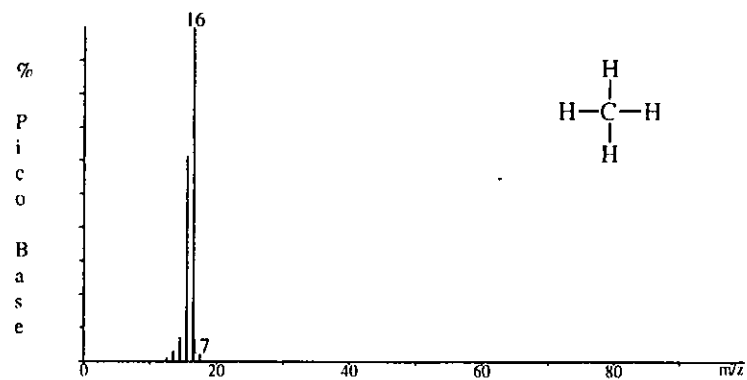


Figura B1. Espectros de masas (IE) e infrarrojo del metano utilizado para simular la atmósfera de Titán (izquierda) y del etano producido por irradiación de una troposfera simulada de Titán (derecha). Los espectros fueron obtenidos en un sistema CG-EM-EIR(TF).

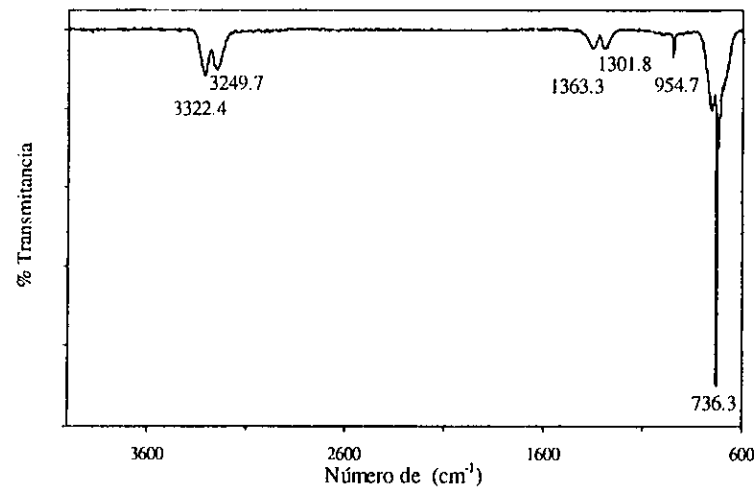
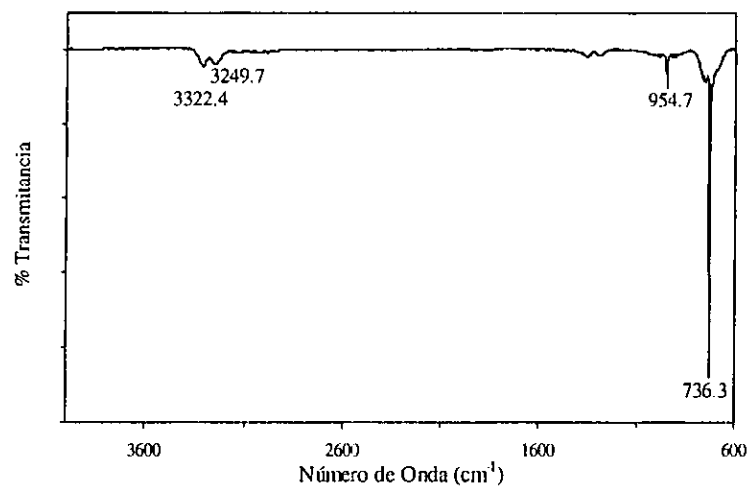
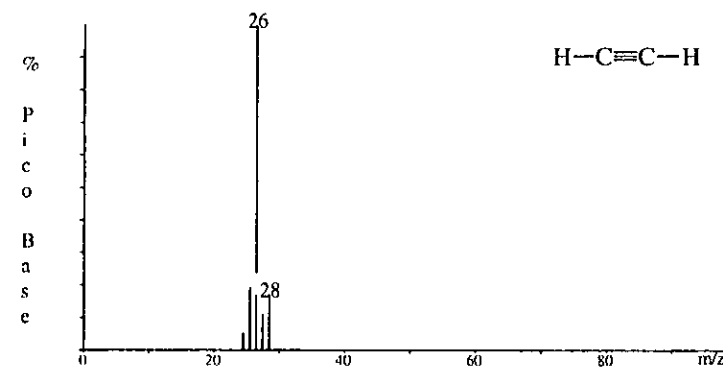
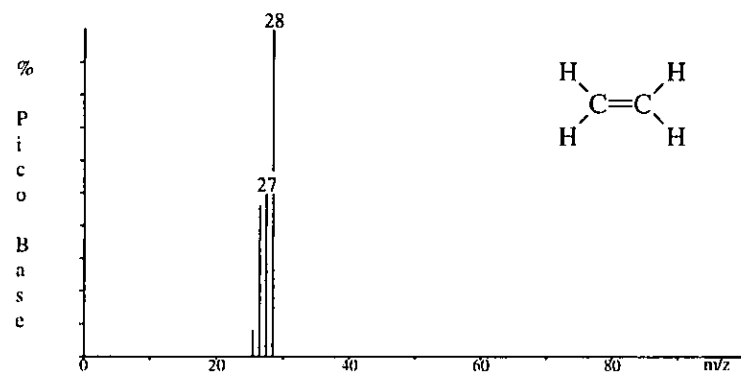


Figura B2. Espectros de masas (IE) e infrarrojo del eteno (izquierda) y del etino (derecha) producidos por irradiación de una troposfera simulada de Titán. Los espectros fueron obtenidos en un sistema CG-EM-EIR(TF).

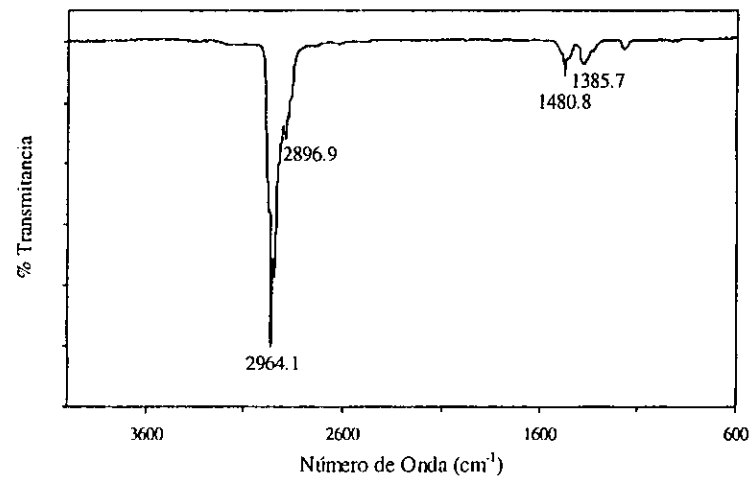
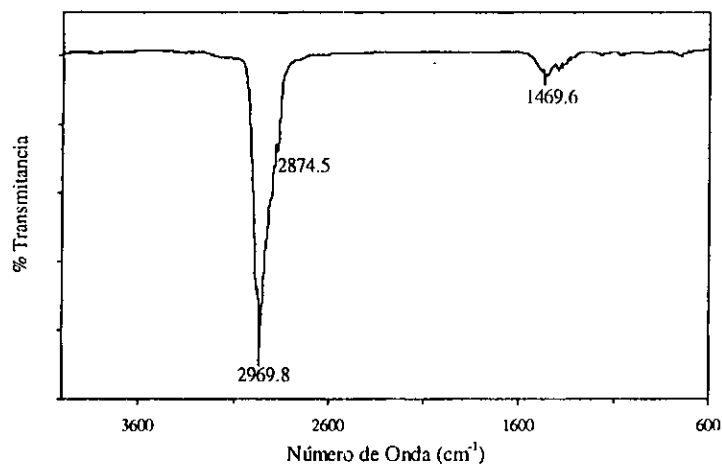
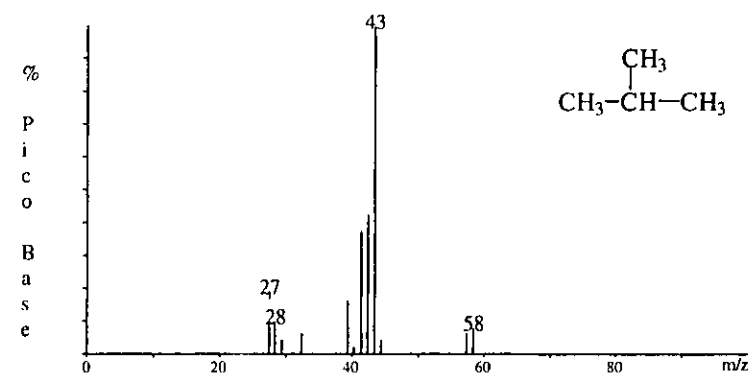
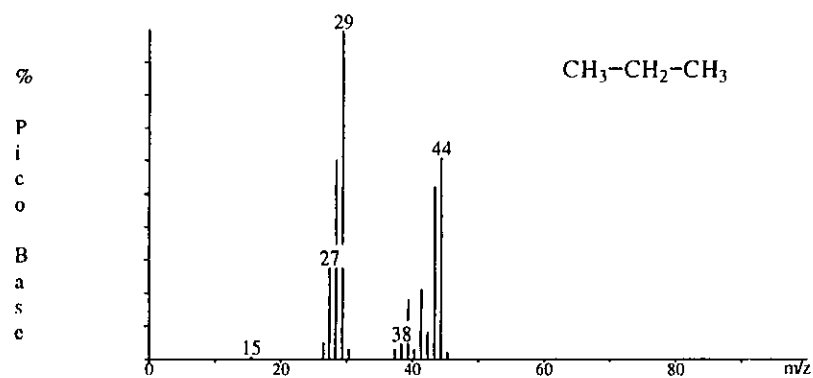


Figura B3. Espectros de masas (IE) e infrarrojo del propano (izquierda) y del 2-metilpropano (derecha) producidos por irradiación de una troposfera simulada de Titán. Los espectros fueron obtenidos en un sistema CG-EM-EIR(TF).

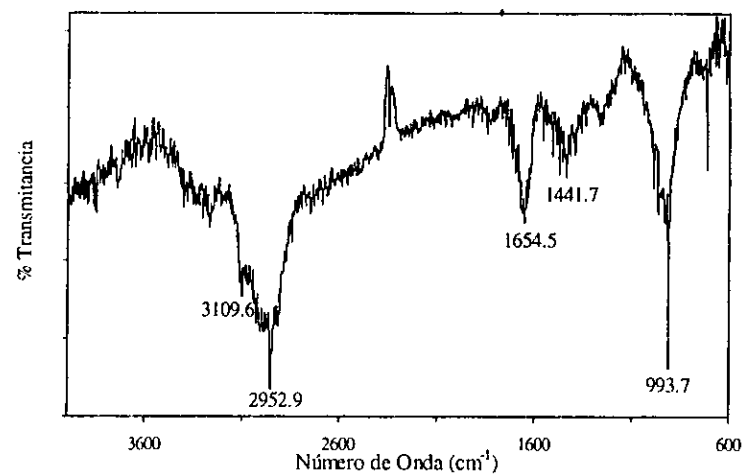
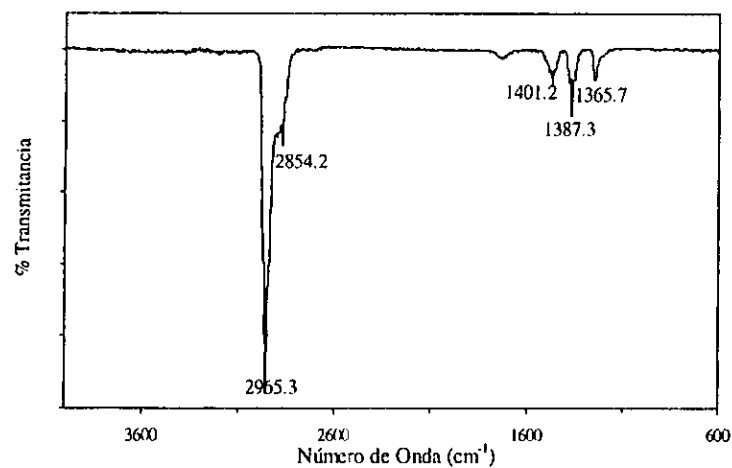
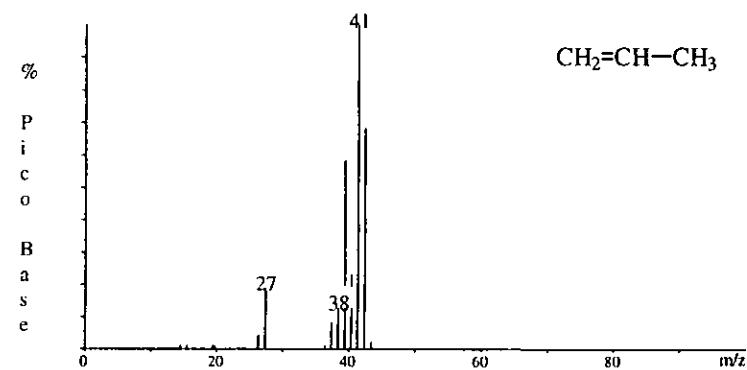
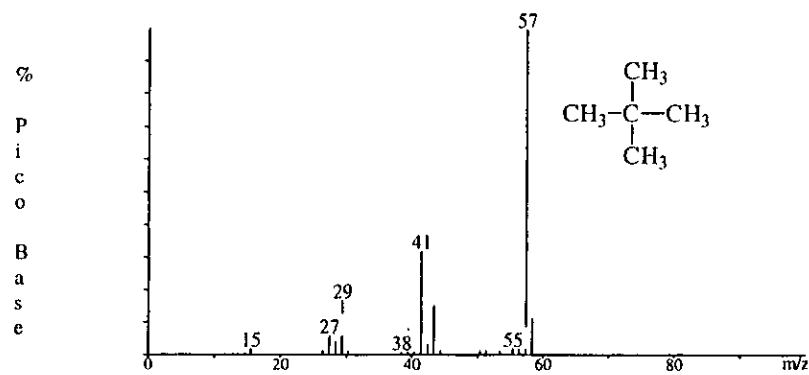


Figura B4. Espectros de masas (IE) e infrarrojo del 2,2-dimetilpropano (izquierda) y del propeno (derecha) producidos por irradiación de una troposfera simulada de Titán. Los espectros fueron obtenidos en un sistema CG-EM-EIR(TF).

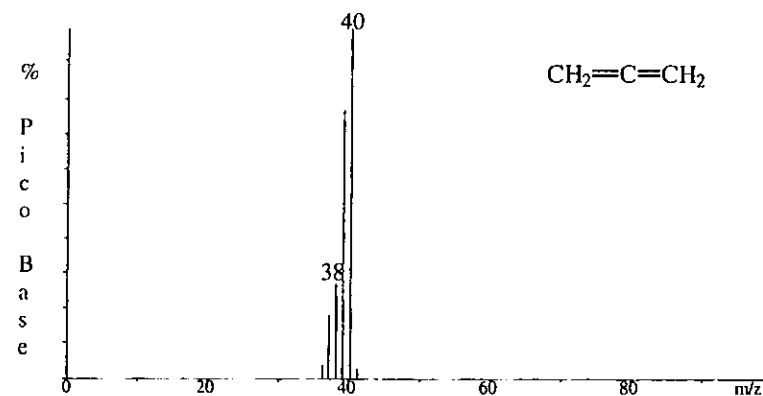
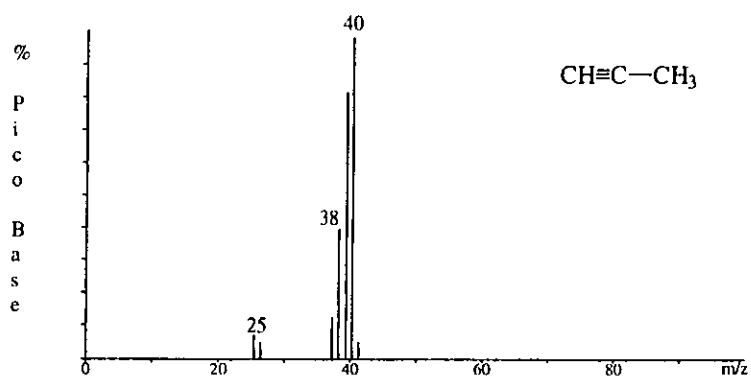
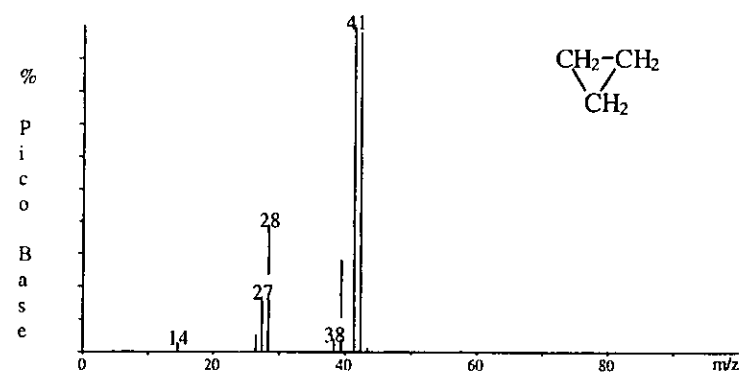
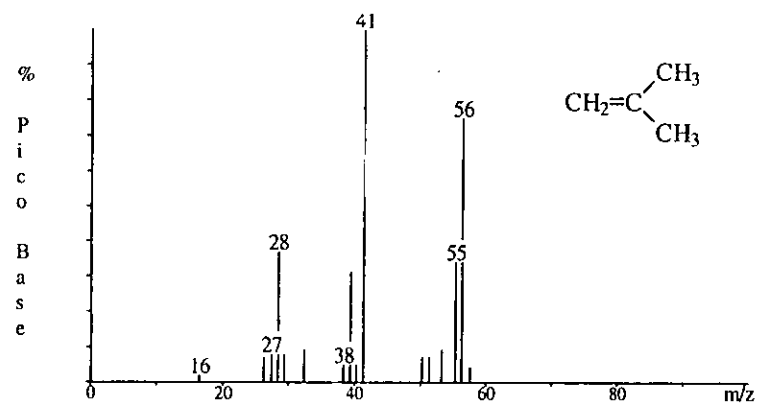


Figura B5. Espectros de masas (IE) del 2-metilpropeno (arriba izquierda), del ciclopropano (arriba derecha), del propino (abajo izquierda) y del propadieno (abajo derecha) producidos por irradiación de una troposfera simulada de Titán. Los espectros fueron obtenidos en un sistema CG-EM-EIR(TF).

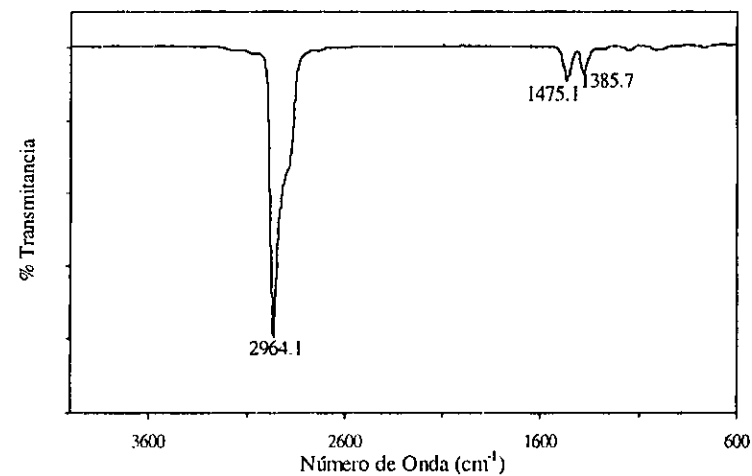
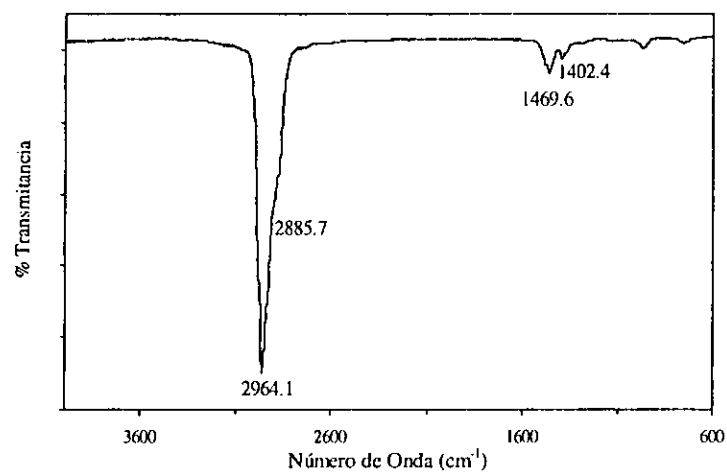
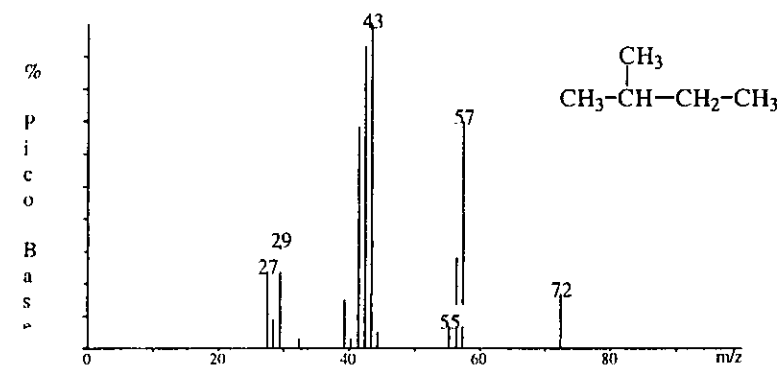
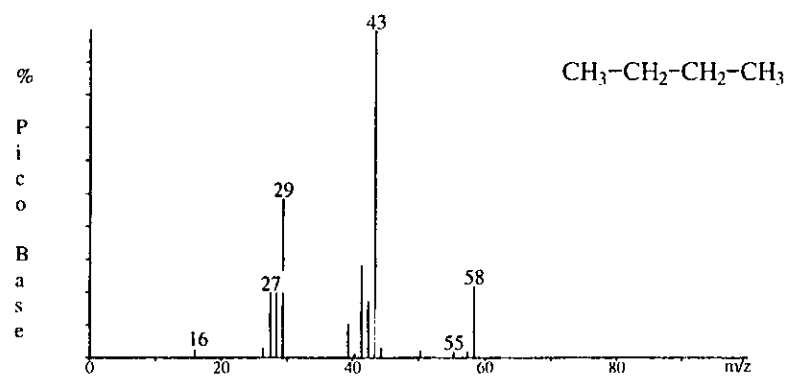


Figura B6. Espectros de masas (IE) e infrarrojo del n-butano (izquierda) y del 2-metilbutano (derecha) producidos por irradiación de una troposfera simulada de Titán. Los espectros fueron obtenidos en un sistema CG-EM-EIR(TF).

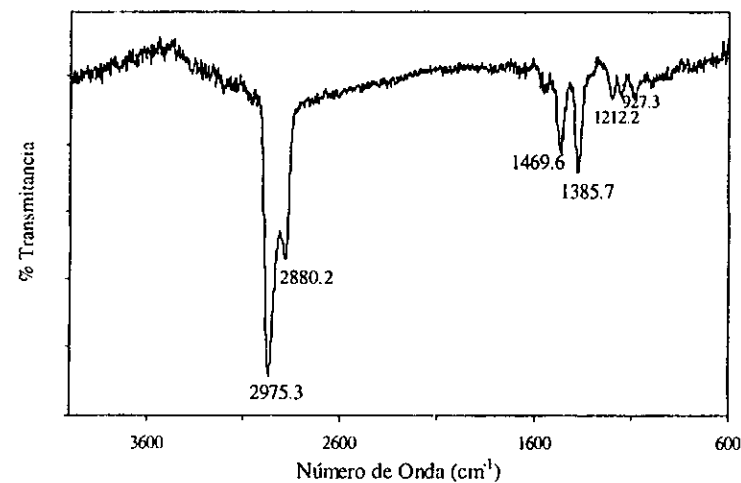
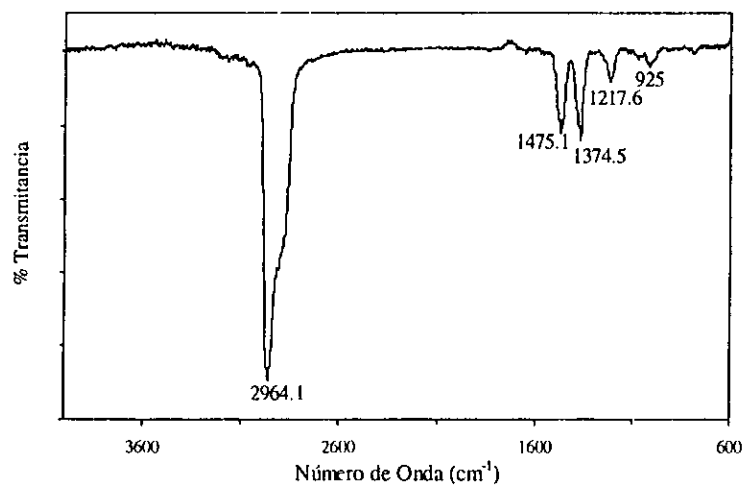
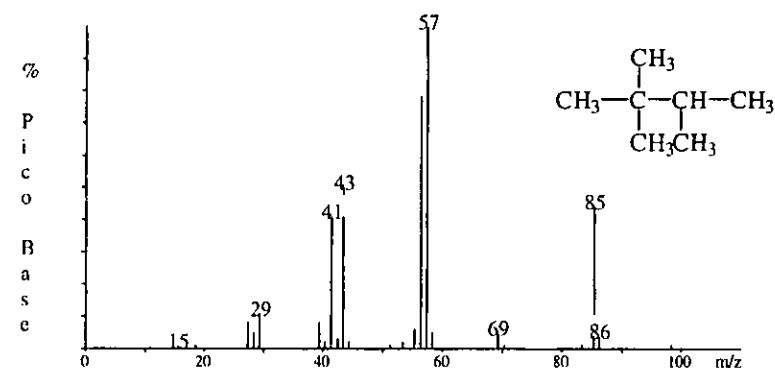
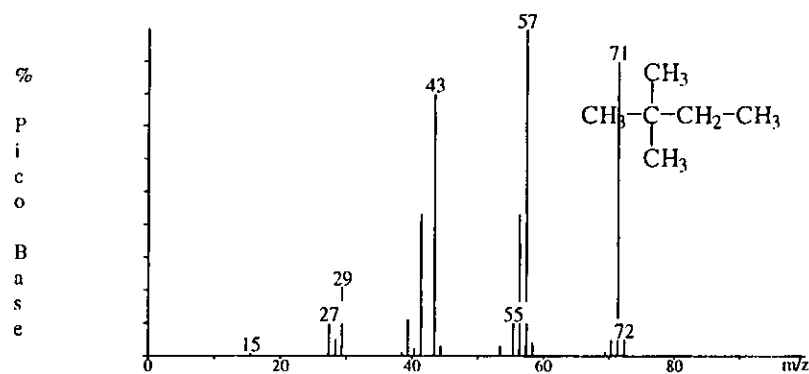


Figura B7. Espectros de masas (IE) e infrarrojo del 2,2-dimetilbutano (izquierda) y del 2,2,3-trimetilbutano (derecha) producidos por irradiación de una troposfera simulada de Titán. Los espectros fueron obtenidos en un sistema CG-EM-EIR(TF).

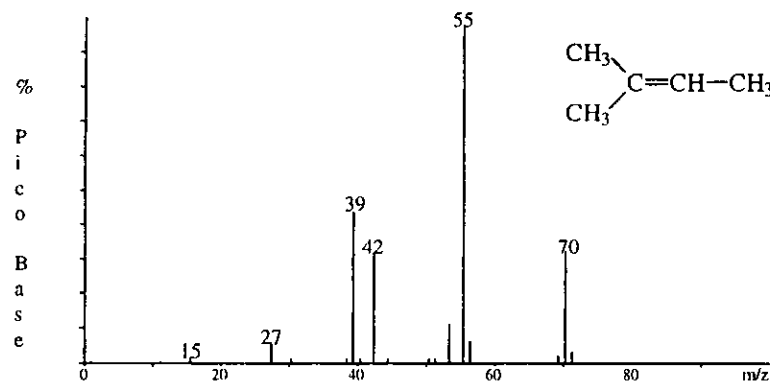
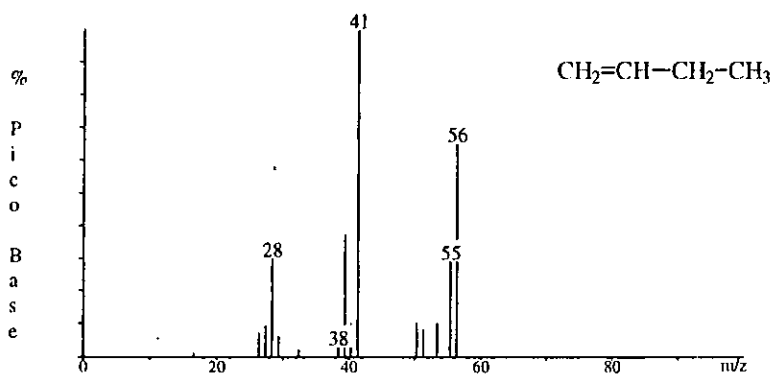
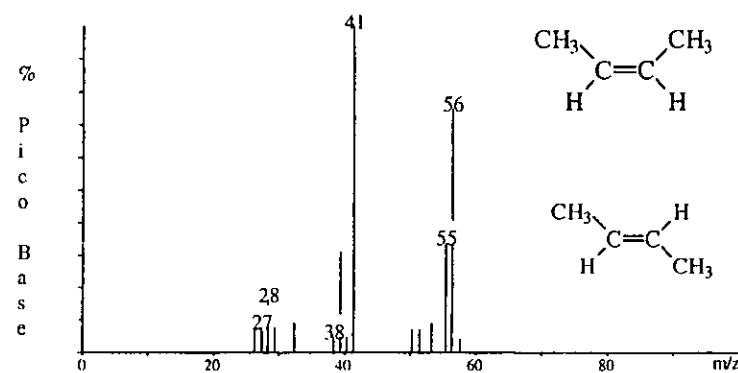
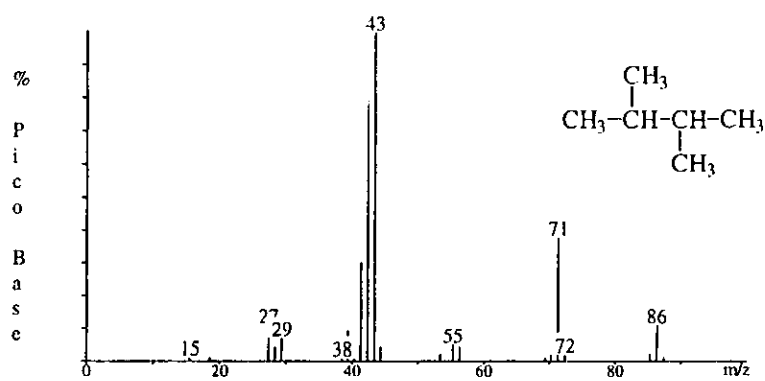


Figura B8. Espectros de masas (IE) del 2,3-dimetilbutano (arriba izquierda), del 1-buteno (abajo izquierda), del 2-buteno cis y trans (arriba derecha) y del 2-metil-2-buteno (abajo derecha) producidos por irradiación de una troposfera simulada de Titán. Los espectros fueron obtenidos en un sistema CG-EM-EIR(TF)

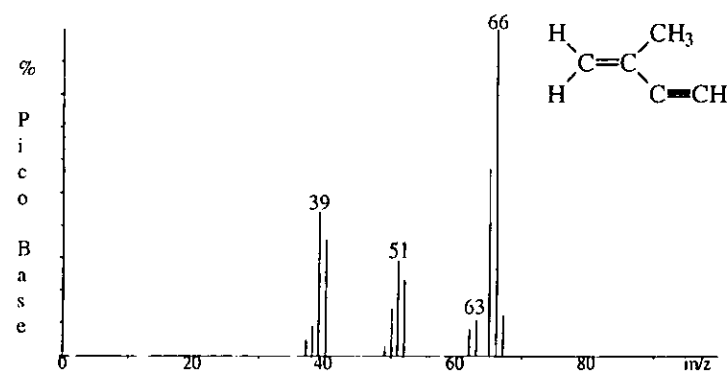
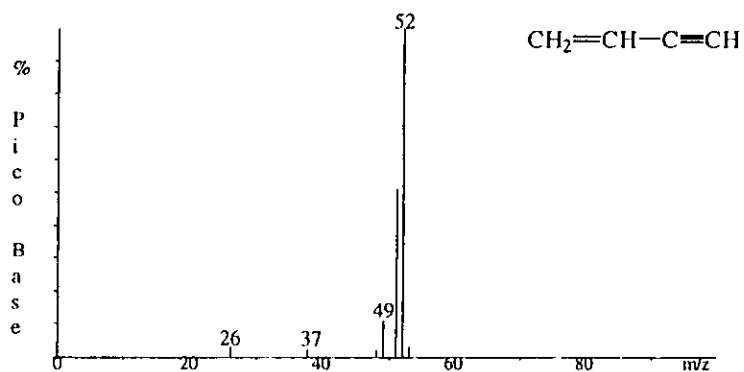
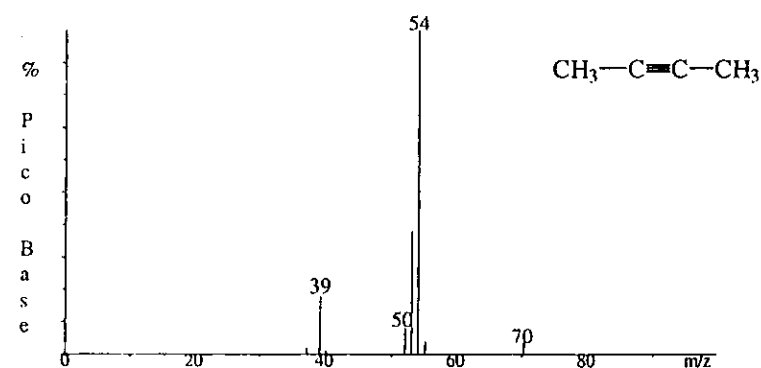
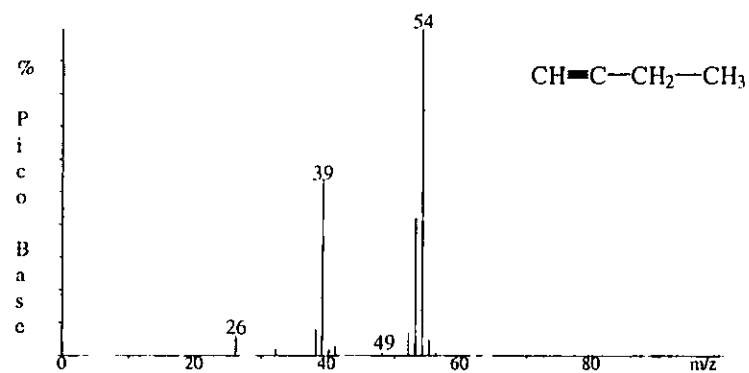


Figura B9. Espectros de masas (IE) del butino (arriba izquierda), del 1-buten-3-ino (abajo izquierda), del 2-butino (arriba derecha) y del 2-metil-1-buten-3-ino (abajo derecha) producidos por irradiación de una troposfera simulada de Titán. Los espectros fueron obtenidos en un sistema CG-EM-EIR(TF).

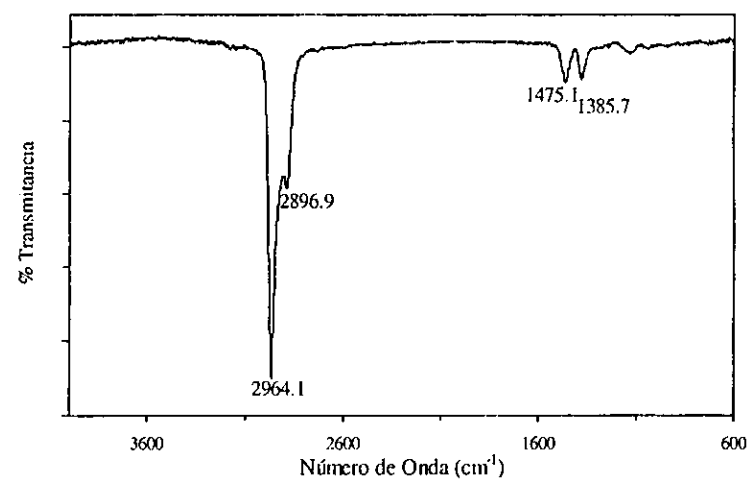
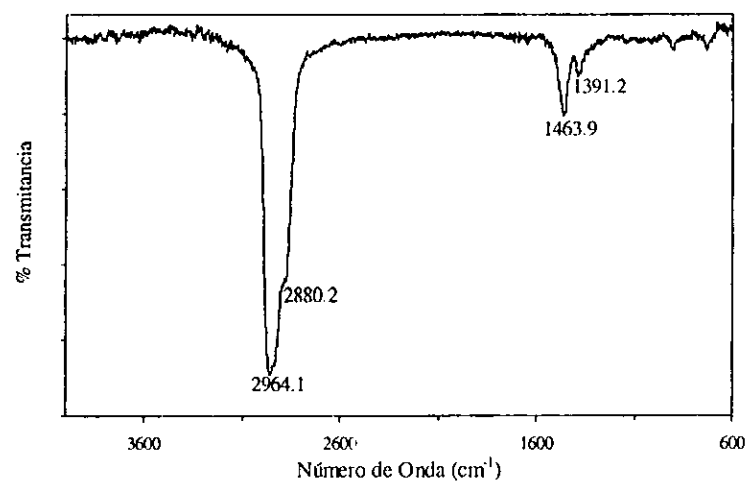
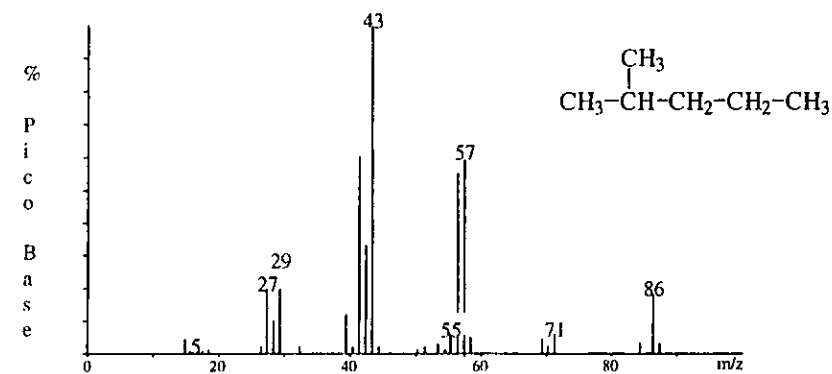
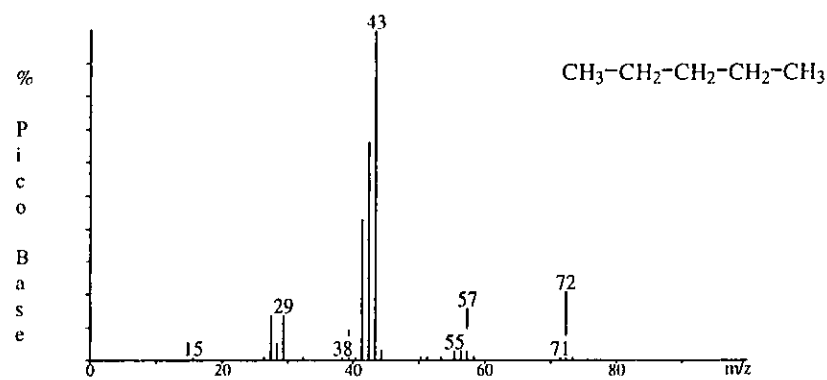


Figura B10. Espectros de masas (IE) e infrarrojo del n-pentano (izquierda) y del 2-metilpentano (derecha) producidos por irradiación de una troposfera simulada de Titán. Los espectros fueron obtenidos en un sistema CG-EM-EIR(TF).

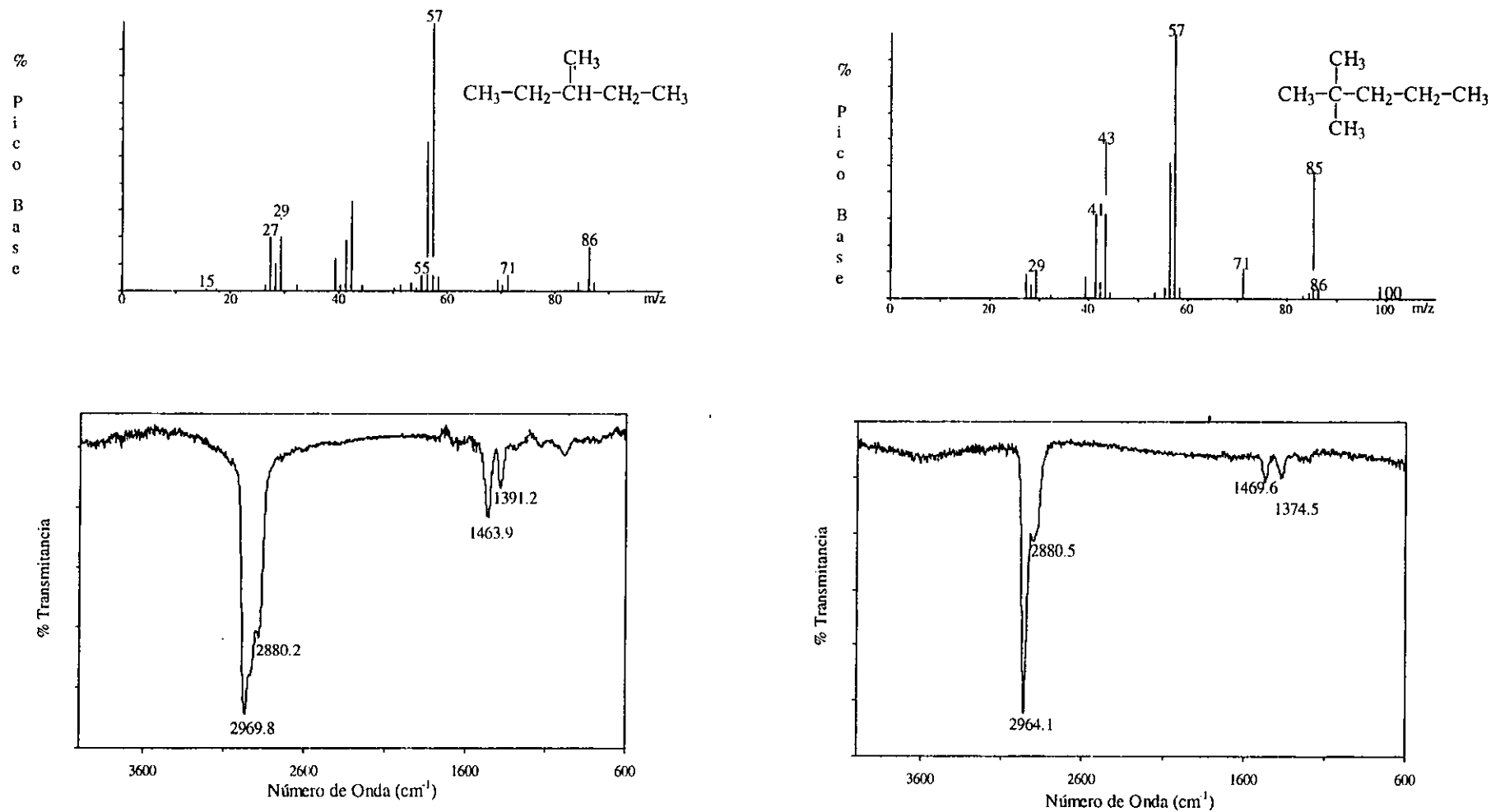


Figura B11. Espectros de masas (IE) e infrarrojo del 3-metilpentano (izquierda) y del 2,2-dimetilpentano (derecha) producidos por irradiación de una troposfera simulada de Titán. Los espectros fueron obtenidos en un sistema CG-EM-EIR(TF).

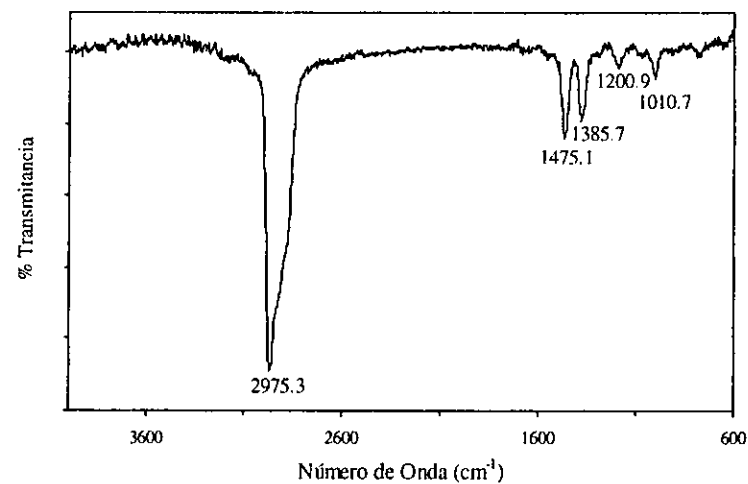
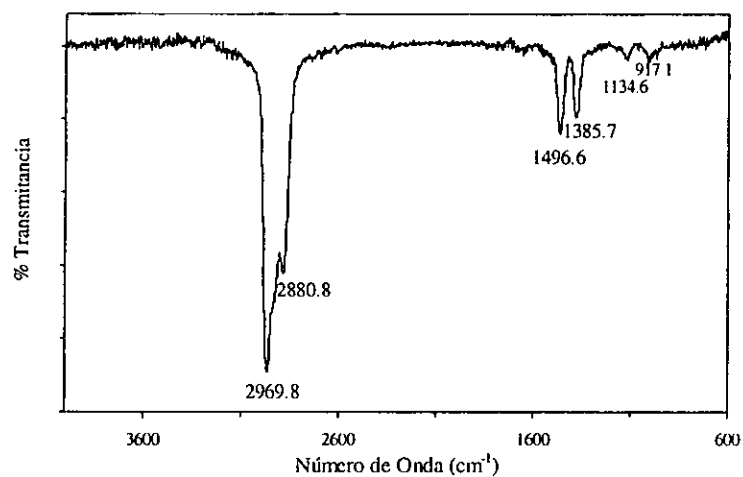
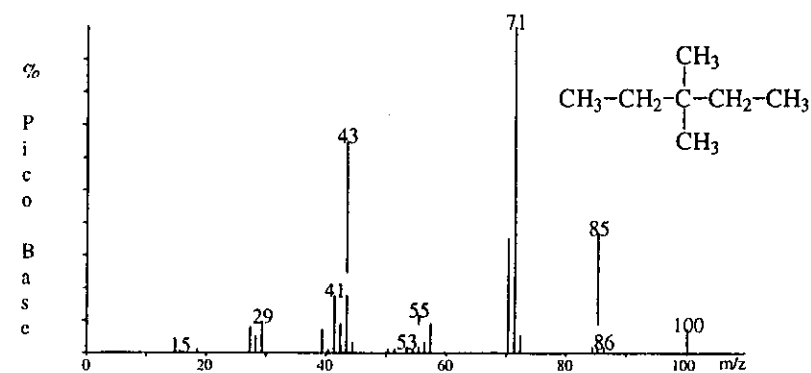
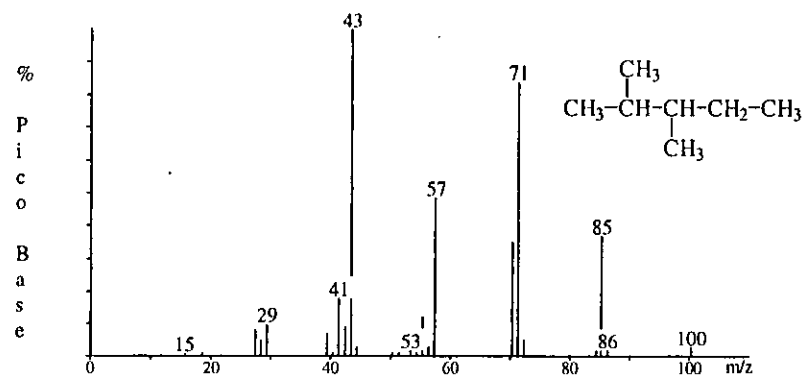


Figura B12. Espectros de masas (IE) e infrarrojo del 2,3-dimetilpentano (izquierda) y del 3,3-dimetilpentano (derecha) producidos por irradiación de una troposfera simulada de Titán. Los espectros fueron obtenidos en un sistema CG-EM-EIR(TF).

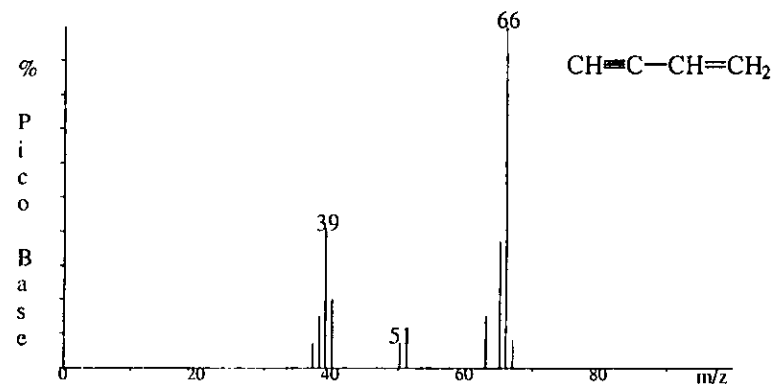
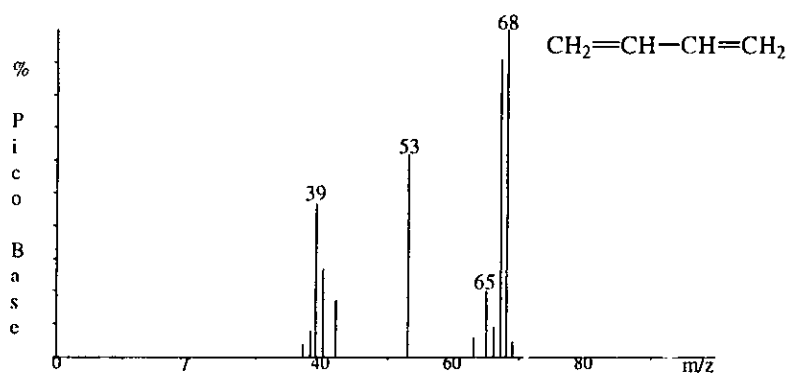
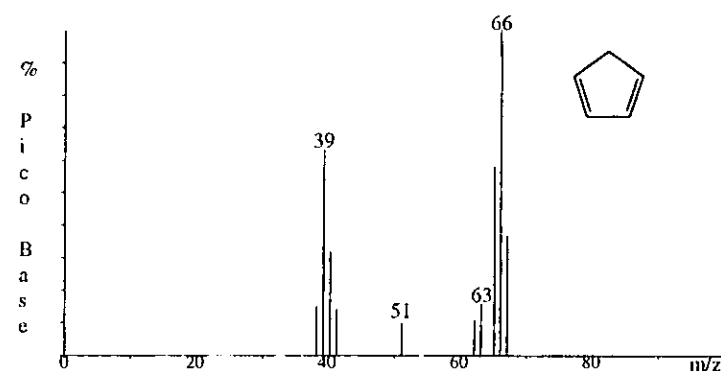
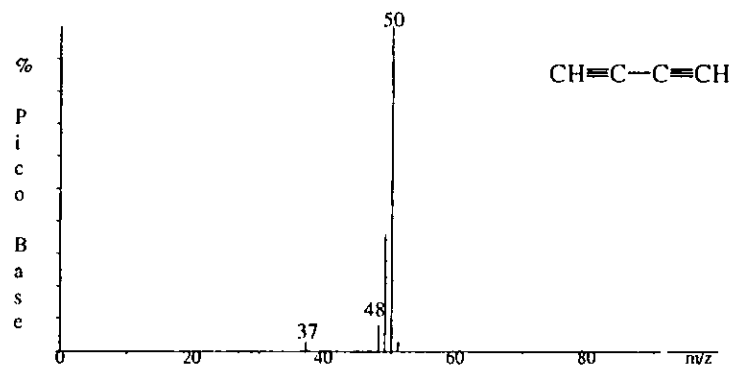


Figura B13. Espectros de masas (IE) del 1,3-butadieno (arriba izquierda), del ciclopentadieno (arriba derecha), del 1,3-pentadieno (abajo izquierda) y del 3-penten-1-ino (abajo derecha) producidos por irradiación de una troposfera simulada de Titán. Los espectros fueron obtenidos en un sistema CG-EM-EIR(TF).

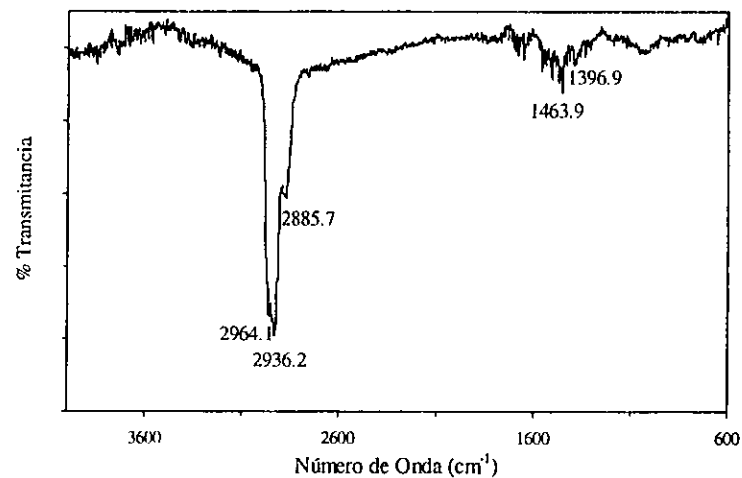
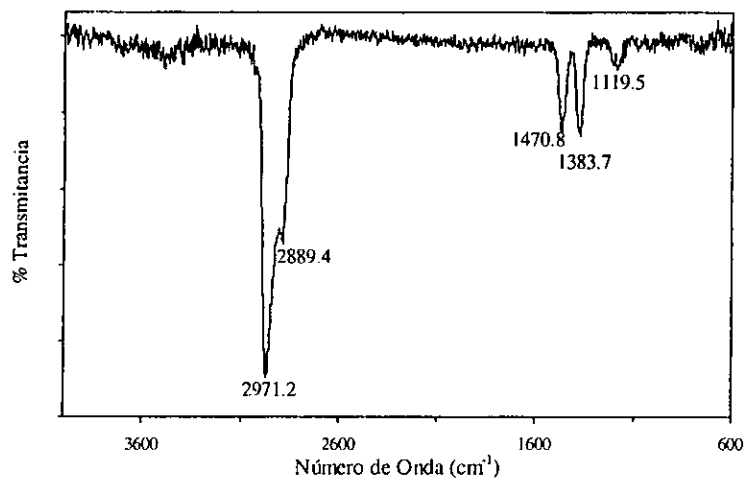
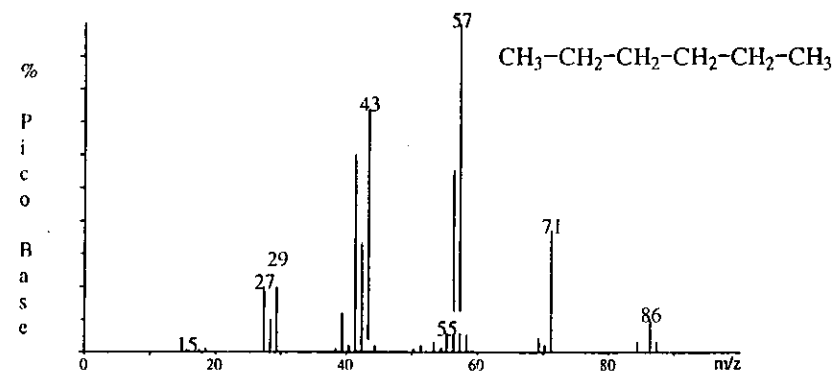
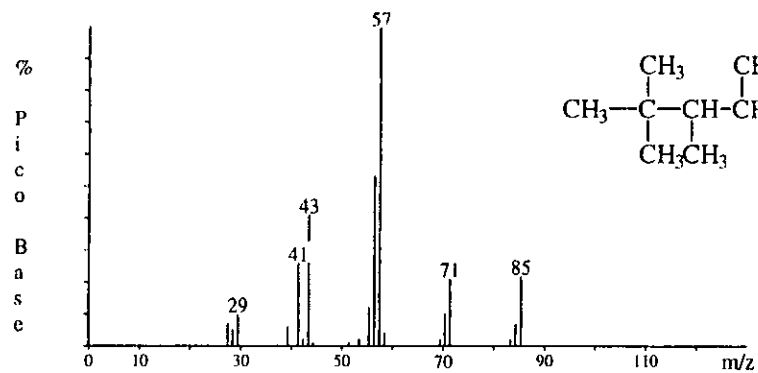


Figura B14. Espectros de masas (IE) e infrarrojo del 2,2,3,4-tetrametilpentano (izquierda) y del n-hexano (derecha) producidos por irradiación de una troposfera simulada de Titán. Los espectros fueron obtenidos en un sistema CG-EM-EIR(TF).

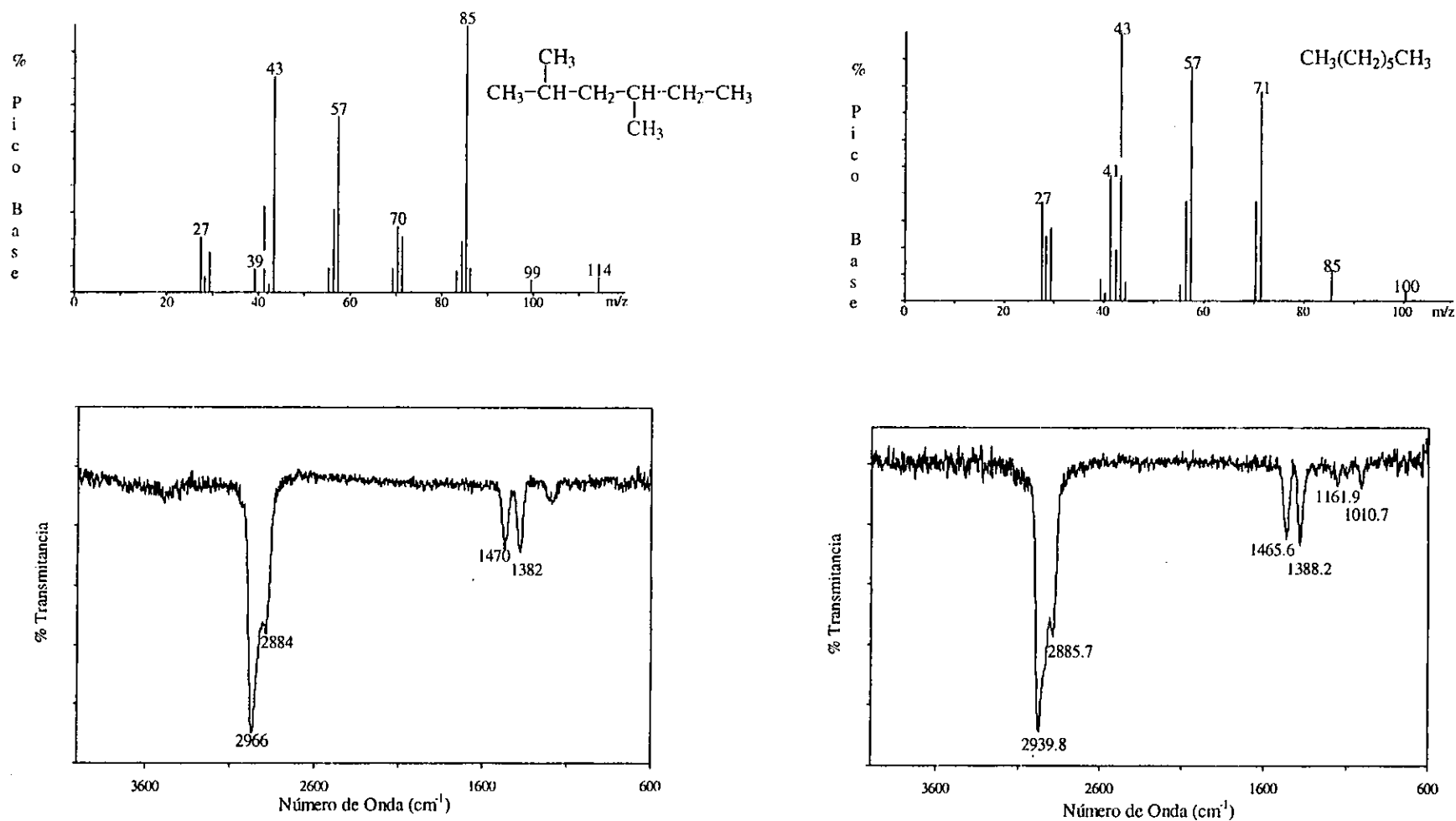


Figura B15. Espectros de masas (IE) e infrarrojo del 2,4-dimetilhexano (izquierda) y del n-heptano (derecha) producidos por irradiación de una troposfera simulada de Titán. Los espectros fueron obtenidos en un sistema CG-EM-EIR(TF).

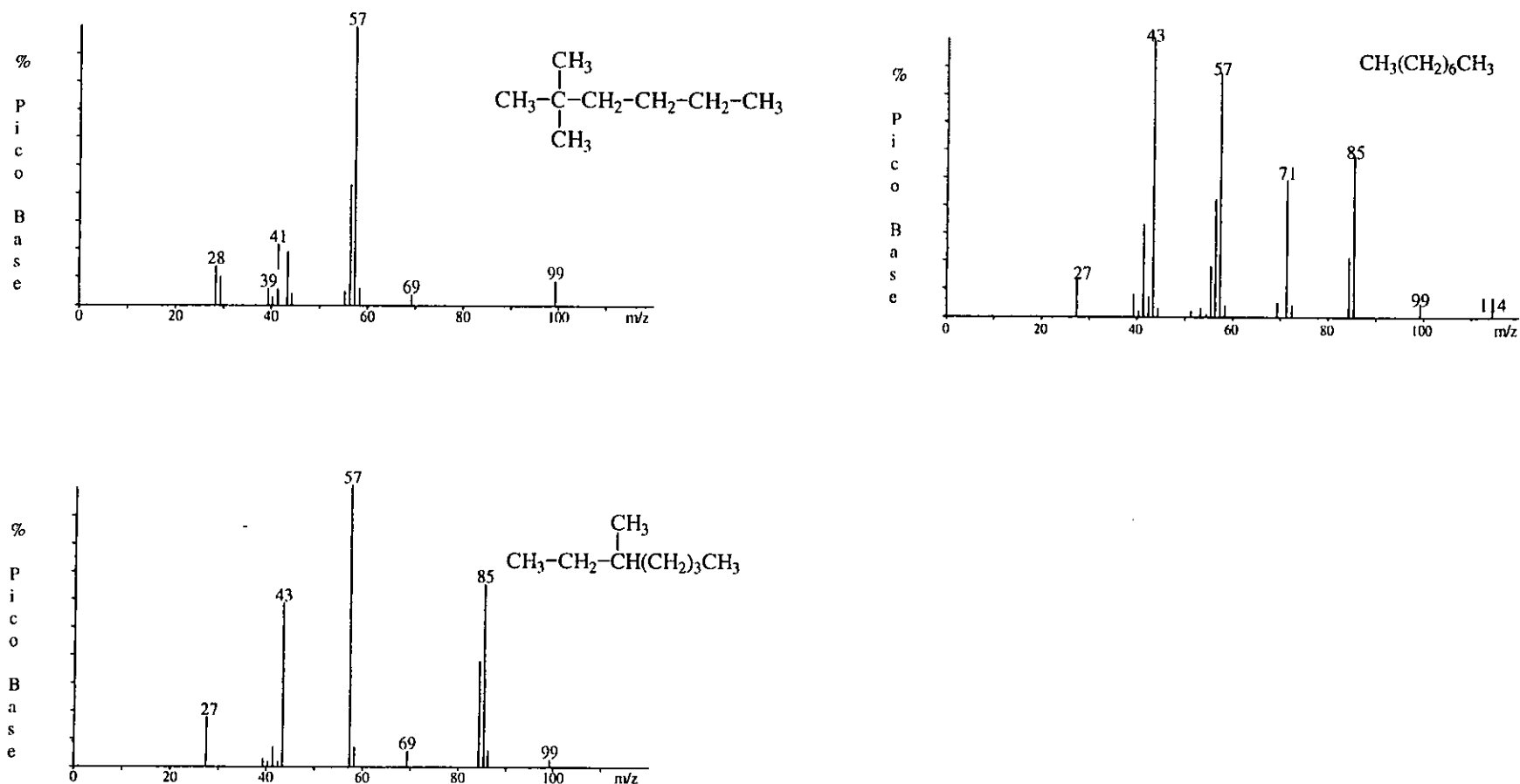


Figura B16. Espectros de masas (IE) del 2,2-dimetilhexano (arriba izquierda), del 3-metilheptano (abajo izquierda) y del n-octano (arriba derecha) producidos por irradiación de una troposfera simulada de Titán. Los espectros fueron obtenidos en un sistema CG-EM-EIR(TF).

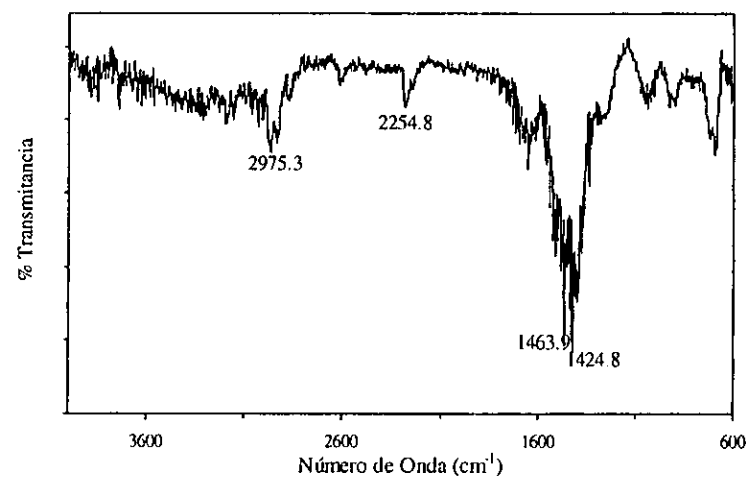
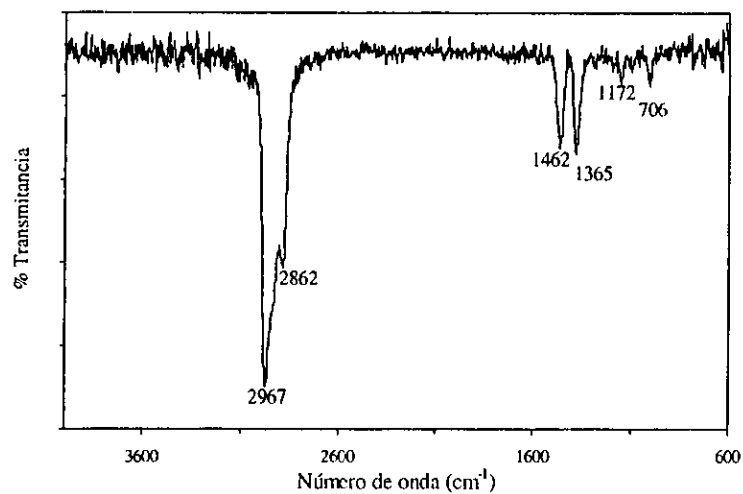
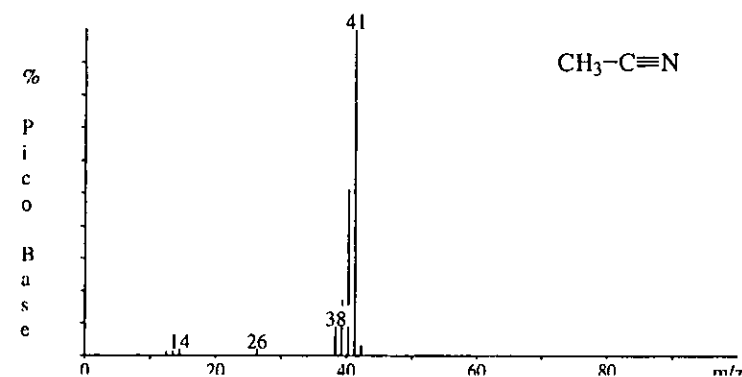
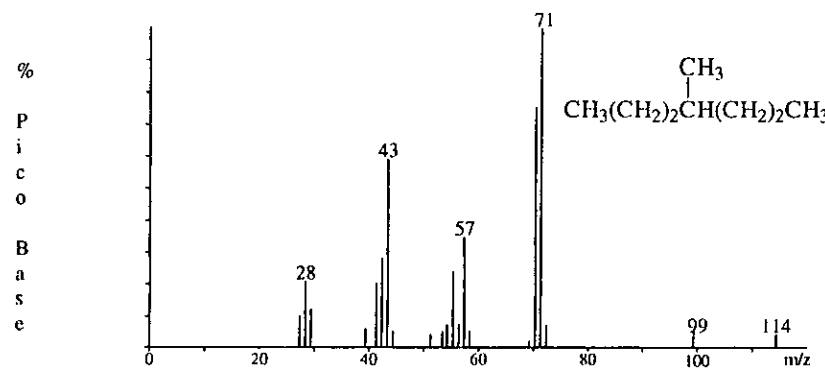


Figura B17. Espectros de masas (IE) e infrarrojo del 4-metilheptano (izquierda) y del etanonitrilo (derecha) producidos por irradiación de una troposfera simulada de Titán. Los espectros fueron obtenidos en un sistema CG-EM-EIR(TF).

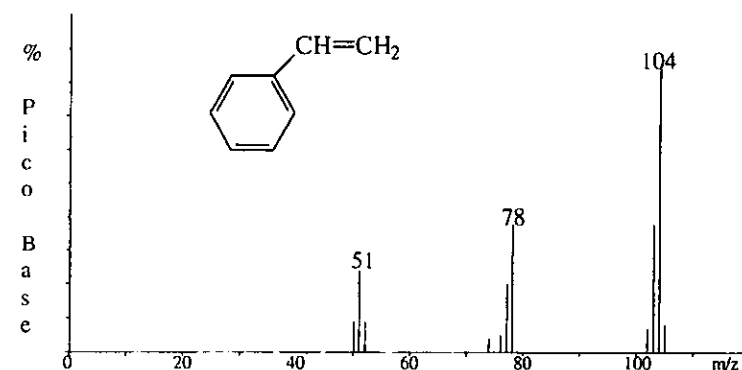
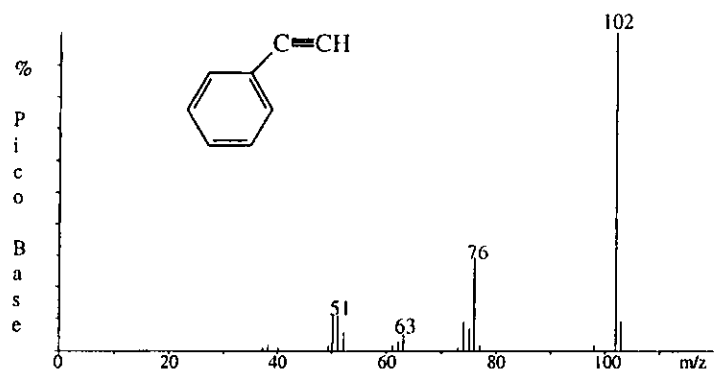
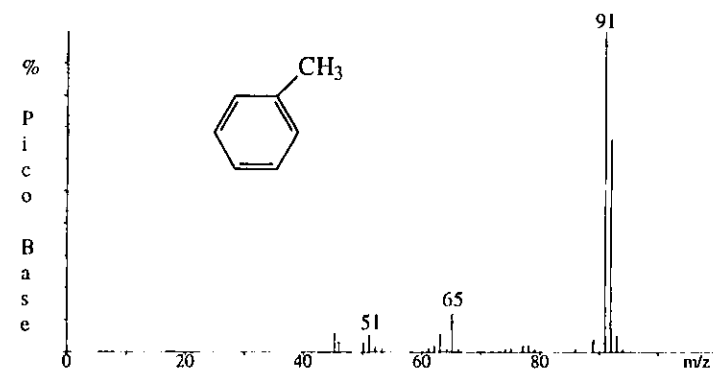
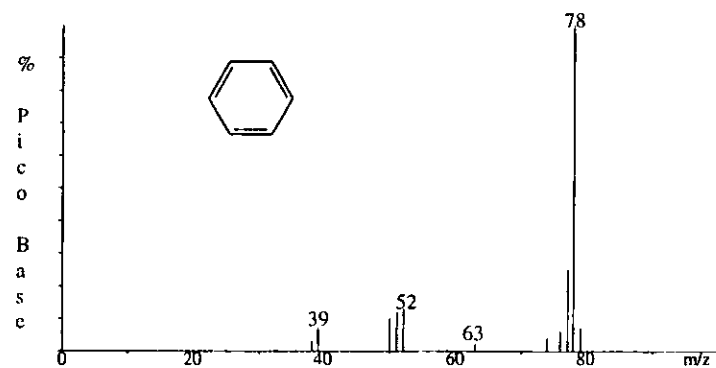


Figura B18. Espectros de masas (IE) del benceno (arriba izquierda), del tolueno (arriba derecha), del fenilacetileno (abajo izquierda) y del vinilbenceno (abajo derecha) producidos por irradiación de una troposfera simulada de Titán. Los espectros fueron obtenidos en un sistema CG-EM-EIR(TF).

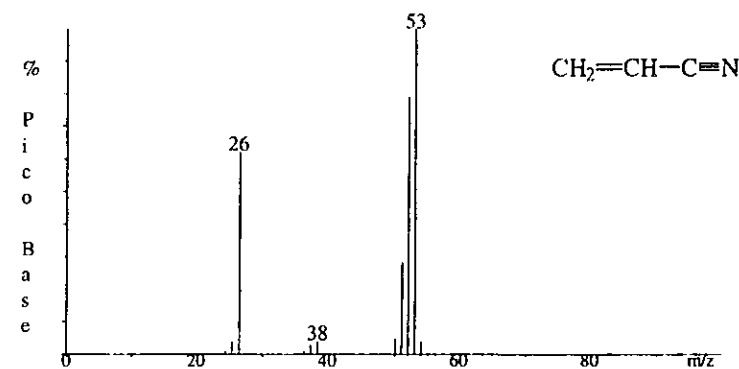
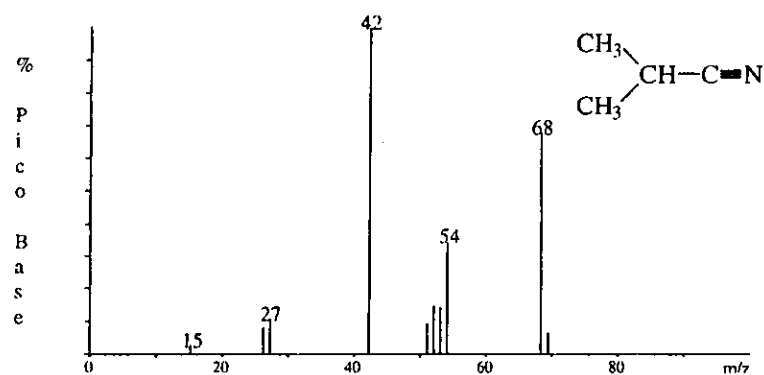
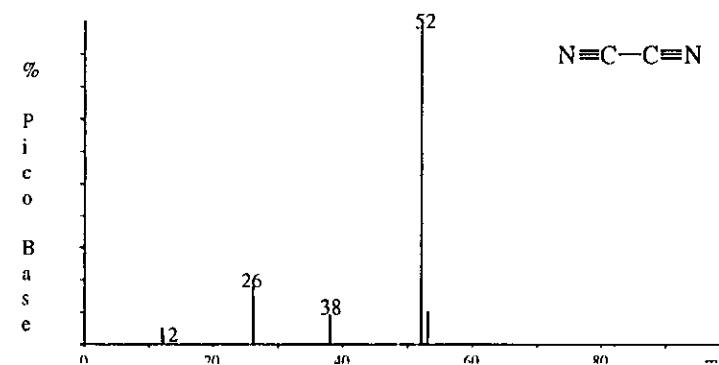
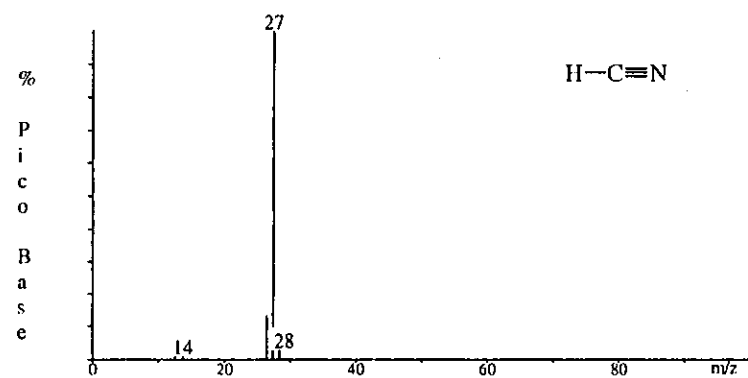


Figura B19. Espectros de masas (IE) del metanonitrilo (arriba izquierda), del etanodinitrilo (arriba derecha), del 2-metilpropanonitrilo (abajo izquierda) y del 2-propenenitrilo (abajo derecha) producidos por irradiación de una troposfera simulada de Titán. Los espectros fueron obtenidos en un sistema CG-EM-EIR(TF).

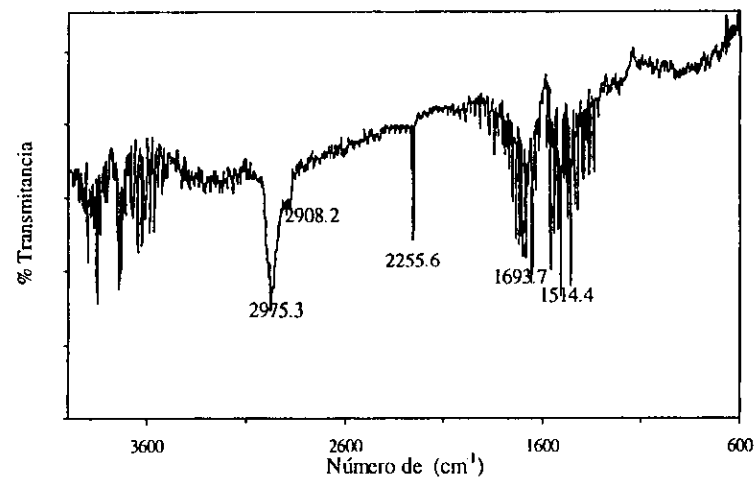
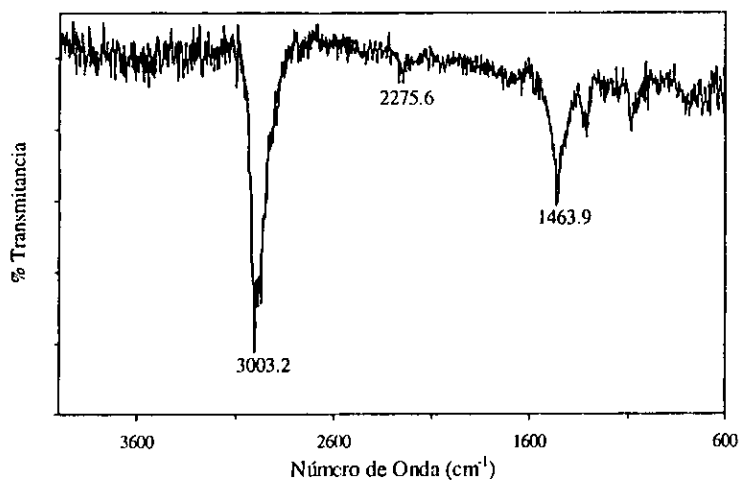
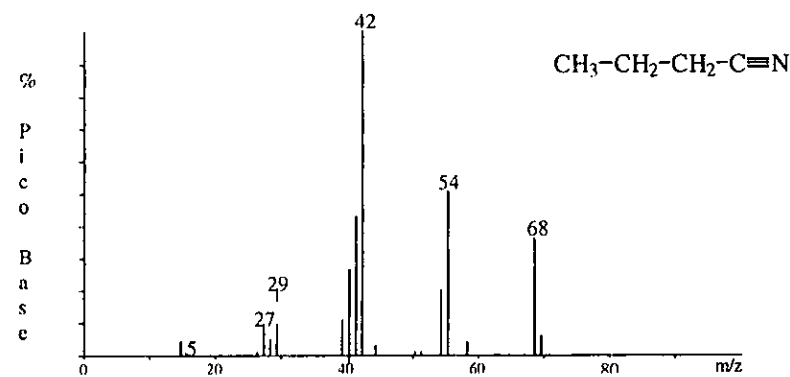
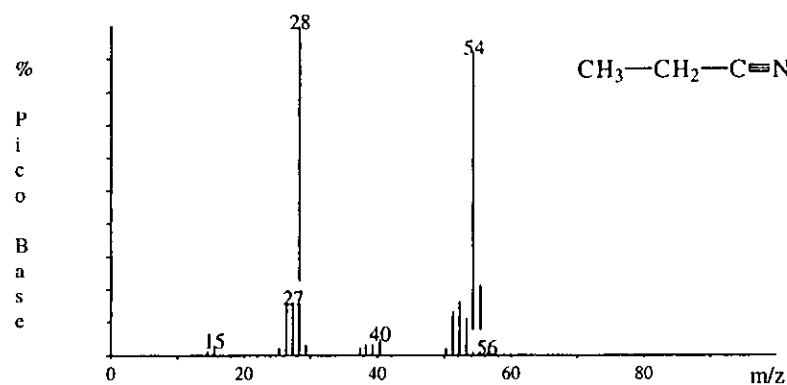


Figura B20. Espectros de masas (IE) e infrarrojo del propanonitrilo (izquierda) y del butanonitrilo (derecha) producidos por irradiación de una troposfera simulada de Titán. Los espectros fueron obtenidos en un sistema CG-EM-EIR(TF).

APENDICE C

Valores promedio de los parámetros del índice de refracción complejo de los análogos de los aerosoles estratosféricos de Titán

Tabla 10. Valores promedio del índice de refracción (n) y coeficiente de extinción (k) de los análogos de los aerosoles de Titán producidos después de la irradiación, con una descarga luminosa, de una estratosfera simulada (N₂:CH₄; 98:2) a 2 mbar y 293 K.

Longitud de onda (nm)	n	Δn	Longitud de onda (nm)	k	Δk
199.5	1.6805	0.0204	200	0.0197	0.0075
204.5	1.6671	0.0135	205	0.0202	0.0076
209.5	1.6600	0.0122	210	0.0207	0.0078
214.5	1.6537	0.0153	215	0.0212	0.0080
219.5	1.6515	0.0143	220	0.0217	0.0082
224.5	1.6490	0.0136	225	0.0222	0.0084
229.5	1.6463	0.0125	230	0.0227	0.0086
234.5	1.6436	0.0113	235	0.0232	0.0088
239.5	1.6411	0.0093	240	0.0238	0.0090
244.5	1.6380	0.0088	245	0.0243	0.0092
249.5	1.6354	0.0070	250	0.0248	0.0094
254.5	1.6329	0.0058	255	0.0253	0.0096
259.5	1.6306	0.0043	260	0.0258	0.0098
264.5	1.6284	0.0035	265	0.0263	0.0100
269.5	1.6265	0.0022	270	0.0268	0.0102
274.5	1.6246	0.0018	275	0.0273	0.0104
279.5	1.6229	0.0020	280	0.0278	0.0105
284.5	1.6211	0.0029	285	0.0281	0.0107
289.5	1.6196	0.0034	290	0.0285	0.0108
294.5	1.6180	0.0042	295	0.0287	0.0109
299.5	1.6165	0.0047	300	0.0287	0.0109
304.5	1.6150	0.0054	305	0.0286	0.0109
309.5	1.6137	0.0057	310	0.0283	0.0107
314.5	1.6123	0.0063	315	0.0278	0.0105
319.5	1.6111	0.0065	320	0.0271	0.0103
324.5	1.6100	0.0069	325	0.0262	0.0099
329.5	1.6090	0.0071	330	0.0253	0.0096
334.5	1.6080	0.0072	335	0.0242	0.0092
339.5	1.6072	0.0072	340	0.0231	0.0088
344.5	1.6064	0.0073	345	0.0220	0.0083
349.5	1.6056	0.0073	350	0.0208	0.0079
354.5	1.6048	0.0073	355	0.0197	0.0075
359.5	1.6040	0.0075	360	0.0186	0.0071
364.5	1.6032	0.0076	365	0.0175	0.0066
369.5	1.6024	0.0078	370	0.0165	0.0063
374.5	1.6015	0.0080	375	0.0155	0.0059
379.5	1.6006	0.0083	380	0.0146	0.0055
384.5	1.5996	0.0086	385	0.0137	0.0052
389.5	1.5986	0.0091	390	0.0128	0.0049
394.5	1.5975	0.0096	395	0.0120	0.0046

Tabla 10. (Continuación)

Longitud de onda (nm)	n	Δn	Longitud de onda (nm)	k	Δk
399.5	1.5964	0.0102	400	0.0113	0.0043
404.5	1.5952	0.0107	405	0.0106	0.0040
409.5	1.5939	0.0115	410	0.0099	0.0038
414.5	1.5926	0.0122	415	0.0093	0.0035
419.5	1.5912	0.0130	420	0.0087	0.0033
424.5	1.5898	0.0139	425	0.0082	0.0031
429.5	1.5884	0.0148	430	0.0077	0.0029
434.5	1.5869	0.0157	435	0.0072	0.0027
439.5	1.5854	0.0166	440	0.0068	0.0026
444.5	1.5839	0.0175	445	0.0064	0.0024
449.5	1.5825	0.0184	450	0.0060	0.0023
454.5	1.5811	0.0193	455	0.0056	0.0021
459.5	1.5798	0.0201	460	0.0053	0.0020
464.5	1.5784	0.0209	465	0.0050	0.0019
469.5	1.5771	0.0217	470	0.0047	0.0018
474.5	1.5758	0.0226	475	0.0045	0.0017
479.5	1.5746	0.0233	480	0.0042	0.0016
484.5	1.5734	0.0240	485	0.0040	0.0015
489.5	1.5726	0.0244	490	0.0038	0.0014
494.5	1.5719	0.0246	495	0.0036	0.0014
499.5	1.5716	0.0246	500	0.0034	0.0013
504.5	1.5714	0.0245	505	0.0032	0.0012
509.5	1.5711	0.0244	510	0.0031	0.0012
514.5	1.5708	0.0245	515	0.0029	0.0011
519.5	1.5704	0.0245	520	0.0028	0.0010
524.5	1.5699	0.0247	525	0.0026	0.0010
529.5	1.5693	0.0251	530	0.0025	0.0009
532.5	1.5692	0.0251	535	0.0024	0.0009
537.5	1.5691	0.0251	540	0.0023	0.0009
542.5	1.5688	0.0250	545	0.0021	0.0008
547.5	1.5685	0.0252	550	0.0020	0.0008
552.5	1.5681	0.0252	555	0.0020	0.0007
557.5	1.5677	0.0254	560	0.0019	0.0007
562.5	1.5673	0.0254	565	0.0018	0.0007
567.5	1.5669	0.0257	570	0.0017	0.0006
572.5	1.5664	0.0257	575	0.0016	0.0006
577.5	1.5660	0.0259	580	0.0016	0.0006
582.5	1.5655	0.0258	585	0.0015	0.0006
587.5	1.5653	0.0257	590	0.0014	0.0005
592.5	1.5650	0.0254	595	0.0014	0.0005
597.5	1.5648	0.0255	600	0.0013	0.0005
602.5	1.5644	0.0252	605	0.0013	0.0005
607.5	1.5639	0.0250	610	0.0012	0.0005
612.5	1.5629	0.0240	615	0.0012	0.0004
617.5	1.5613	0.0226	620	0.0011	0.0004
622.5	1.5600	0.0217	625	0.0011	0.0004
627.5	1.5592	0.0218	630	0.0011	0.0004
632.5	1.5584	0.0211	635	0.0010	0.0004
637.5	1.5578	0.0211	640	0.0010	0.0004
642.5	1.5571	0.0205	645	0.0010	0.0004
647.5	1.5566	0.0203	650	0.0009	0.0004

Tabla 10. (Continuación)

Longitud de onda (nm)	n	Δn	Longitud de onda (nm)	k	Δk
652.5	1.5561	0.0196	655	0.0009	0.0003
657.5	1.5553	0.0186	660	0.0009	0.0003
662.5	1.5543	0.0176	665	0.0009	0.0003
667.5	1.5533	0.0166	670	0.0008	0.0003
672.5	1.5527	0.0165	675	0.0008	0.0003
677.5	1.5520	0.0158	680	0.0008	0.0003
682.5	1.5515	0.0157	685	0.0008	0.0003
687.5	1.5509	0.0151	690	0.0007	0.0003
692.5	1.5504	0.0150	695	0.0007	0.0003
697.5	1.5497	0.0143	700	0.0007	0.0003
702.5	1.5493	0.0143	705	0.0007	0.0003
707.5	1.5487	0.0136	710	0.0007	0.0003
712.5	1.5482	0.0136	715	0.0007	0.0003
717.5	1.5475	0.0129	720	0.0007	0.0003
722.5	1.5470	0.0129	725	0.0006	0.0002
727.5	1.5464	0.0123	730	0.0006	0.0002
732.5	1.5459	0.0123	735	0.0006	0.0002
737.5	1.5454	0.0117	740	0.0006	0.0002
742.5	1.5449	0.0117	745	0.0006	0.0002
747.5	1.5443	0.0112	750	0.0006	0.0002
752.5	1.5438	0.0112	755	0.0006	0.0002
757.5	1.5432	0.0106	760	0.0006	0.0002
762.5	1.5429	0.0105	765	0.0006	0.0002
767.5	1.5424	0.0100	770	0.0006	0.0002
772.5	1.5420	0.0100	775	0.0006	0.0002
777.5	1.5414	0.0095	780	0.0006	0.0002
782.5	1.5410	0.0095	785	0.0006	0.0002
787.5	1.5405	0.0090	790	0.0006	0.0002
792.5	1.5402	0.0089	795	0.0006	0.0002
797.5	1.5397	0.0084	800	0.0006	0.0002
802.5	1.5394	0.0083	805	0.0006	0.0002
807.5	1.5389	0.0077	810	0.0006	0.0002
812.5	1.5387	0.0076	815	0.0006	0.0002
817.5	1.5383	0.0071	820	0.0005	0.0002
822.5	1.5380	0.0069	825	0.0005	0.0002
827.5	1.5377	0.0064	830	0.0005	0.0002
832.5	1.5374	0.0063	835	0.0005	0.0002
837.5	1.5371	0.0057	840	0.0005	0.0002
842.5	1.5368	0.0057	845	0.0005	0.0002
847.5	1.5364	0.0052	850	0.0005	0.0002
853	1.5362	0.0051	855	0.0005	0.0002
858	1.5358	0.0047	860	0.0004	0.0002
863	1.5355	0.0046	865	0.0004	0.0002
868	1.5352	0.0042	870	0.0004	0.0002
873	1.5349	0.0041	875	0.0004	0.0002
878	1.5346	0.0036	880	0.0004	0.0002
883	1.5343	0.0036	885	0.0004	0.0002
888	1.5340	0.0032	890	0.0004	0.0001
893	1.5338	0.0031	895	0.0004	0.0001
898	1.5336	0.0027	900	0.0004	0.0001

Tabla 10. (Continuación)

Longitud de onda (nm)	n	Δn	Longitud de onda (nm)	k	Δk
903	1.5334	0.0026	905	0.0004	0.0001
908	1.5331	0.0023	910	0.0004	0.0001
913	1.5330	0.0022	915	0.0004	0.0001
918	1.5327	0.0019	920	0.0004	0.0001
923	1.5325	0.0018	925	0.0003	0.0001
928	1.5323	0.0016	930	0.0003	0.0001
933	1.5322	0.0015	935	0.0003	0.0001
938	1.5320	0.0012	940	0.0003	0.0001
943	1.5318	0.0012	945	0.0003	0.0001
948	1.5317	0.0009	950	0.0003	0.0001
953	1.5316	0.0008	955	0.0003	0.0001
958	1.5314	0.0005	960	0.0003	0.0001
963	1.5314	0.0004	965	0.0003	0.0001
968	1.5313	0.0001	970	0.0003	0.0001
973	1.5313	0.0002	975	0.0003	0.0001
978	1.5312	0.0003	980	0.0003	0.0001
983	1.5312	0.0006	985	0.0003	0.0001
988	1.5311	0.0007	990	0.0003	0.0001
993	1.5311	0.0010	995	0.0003	0.0001
998	1.5310	0.0096	1000	0.0003	0.0001

7. REFERENCIAS

- Allen M., Pinto J. P. and Yung Y. L. (1980) Titan: Aerosol Photochemistry and Variations related to the Sunspot Cycle. *The Astrophysical Journal* **242**(L125-L128).
- Arai H, Nagai S., Matsuda K. y Hatada M. (1981) Effect of irradiation temperature on the radiolysis of methane. *J. Phys. Chem.* **17**, 151-157.
- Atreya S. K. (1986) *Atmospheres and Ionospheres of the Outer Planets*. Springer-Verlag, New York.
- Atreya S. K., Donahue T. M. and Kuhn W. R. (1978) Evolution of a nitrogen atmosphere on Titan. *Science* **201**, 611-613.
- Awal M. and Lunine J. I. (1994) Moist convective clouds in Titan's atmosphere. *Geophys. Res. Lett.* **21**(23), 2491-2494.
- Bar-Nun A. (1975) Thunderstorms on Jupiter. *Icarus* **24**, 86-94.
- Borucki W. J. and Chameides W. L. (1984) Lightning: Estimates of the rates of energy dissipation and nitrogen fixation. *Rev. Geophys. Space Phys.* **22**, 363-372
- Borucki W. J., McKay C. P. and Whitten R. C. (1984) Possible production by lightning of aerosols and trace gases in Titan's atmosphere. *Icarus* **60**, 260-273.
- Borucki W. J., McKenzie R. L. and McKay C. P. (1985) Spectra of simulated lightning on Venus, Jupiter, and Titan. *Icarus* **64**, 221-232.
- Borucki W. J., Giver L. P., McKay C. P., Scattergood T. and Parris J. E. (1988) Lightning Production of Hydrocarbons and HCN on Titan: Laboratory Measurements. *Icarus* **76**, 125-134.
- Cabane M. and Chassefière F. (1995) Laboratory simulations of Titan's atmosphere: organic gases and aerosols. *Planet. Space Sci* **43**, 47-65.
- Capone L. A., Prasad S. S., Huntress W. T., Whitten R. C., Dubach J. and Santhanam K. (1981) Formation of organic molecules on Titan. *Nature* **293**, 45.
- Capone L. A., Dubach J., Prasad S. S. and Whitten R. C. (1983) Galactic cosmic rays and N₂ dissociation on Titan. *Icarus* **55**, 73-82.
- Chameides W. L. and Walker J. C. G. (1981) Rates of fixation by lightning of carbon and nitrogen in possible primitive atmospheres. *Origins Life* **11**, 291-302.

- Chang S., Scattergood T., Aronowitz S. and Flores J. (1979) Organic chemistry on Titan. *Rev. Geophys. and Space Phys.* **17**, 1923-1933.
- Chang J.-S., Lawless P. A. and Yamamoto T. (1991) Corona Discharge Processes. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **19**(6), 1152 -.
- Chyba C. F., Thomas P. J. and Zahnle K. J. (1993) The 1908 Tunguska explosion: atmospheric disruption of a stony asteroid. *Nature* **361**, 40-44.
- Comas-Solá J. (1908) Observations des satellites principaux de Jupiter et de Titan. *Astron. Nach.* **179**, 289
- Combes M., Vapillon L., Gendron E., Coustenis A., Sirdey R. and Wittenberg R. (1997) Titan imaging by means of adaptative optics in the near infrared. *Icarus* **129**, 482-498.
- Coll P., Coscia D., Gazeau M.-C. and Raulin F. (1997) New planetary atmosphere simulations: application to the organic aerosols of Titan. *Adv. Space Res.* **in press**.
- Coll P., Coscia D., Smith N., Gazeau M.-C., Ramírez S. I., Cernogora G., Israël G. and Raulin F. (1999) Experimental laboratory simulation of Titan's atmosphere (aerosols and gas phase). *Planet. Space Sci.* **47**(10-11), 1331-1340.
- Courtin R., Gautier D. and McKay C. P. (1995) Titan's Thermal Emission Spectrum: Reanalysis of the Voyager Infrared Measurements. *Icarus* **114**, 144-162.
- Coustenis A. and Bézard B. (1995) Titan's atmosphere from Voyager infrared observations. IV. Latitudinal variations of temperature and composition. *Icarus* **115**, 126-140.
- Coustenis A., Bézard B. and Gautier D. (1989) Titan's Atmosphere from Voyager Infrared Observations: I. The Gas Composition of Titan's Equatorial Region. *Icarus* **80**, 54-76.
- Coustenis A., Lellouch E., Mqillqrd J.-P. and McKay C. P. (1995) Titan's surface: composition and variability from the near-infrared albedo. *Icarus* **448**, 87-104.
- Coustenis A., Salama A., Lellouch E., Encrenaz T., Bjoraker G., Samuelson R., de Graauw T., Feuchtgruber H. and Kessler M. F. (1998) Evidence for water vapor in Titan's atmosphere from ISO/SWS data. *Astron. Astrophys.* **336**, L85-L89.
- Coustenis A., Schmitt B., Khanna R. K. and Trotta F. (1999) Plausible condensates in Titan's stratosphere from Voyager infrared data. *Planet. Space Sci.* **47**, 1305-1329.
- Danielson R. E., Caldwell J. J. and Larach D. R. (1973) An inversion in the atmosphere of Titan. *Icarus* **20**, 437-443.
- Demichelis F., Kaniadakis G., Tagliaferro A. and Tresso E. (1987) New approach to optical analysis of absorbing thin solid films. *Applied Optics* **26**(9), 1737-1740.
- Desh M. D. and Kaiser M. L. (1990) Upper limit set for level of lightning activity on Titan. *Nature* **345**, 442-444.

- Do L. Raulin, F. (1989) Gas Chromatography of Titan's Atmosphere I. Analysis of low-molecular hydrocarbons and nitriles with a PoraPLOT Q porous polymer coated open tubular capillary column. *J. Chromatogr.* **481**, 45
- Engel S., Lunine J. I. and Hqrtmann W. K. (1995) Cratering on Titan and implications for Titan's atmospheric history. *Planet; Space Sci;* **43**, 1059-1066.
- Farinella P., Milani A., Nobili A. M., Paolicchi P. and Zappala V. (1983) Hyperion: collisional disruption of a resonant satellite. *Icarus* **54**, 353-360.
- Flasar F. M. (1983) Oceans on Titan? *Science* **201**, 55-57.
- Flasar F. M., Samuelson R. E. and Conrath B. J. (1981) Titan's atmosphere: Temperature and dynamics. *Nature* **292**, 693-698.
- Gautier D. and Morel P. (1997) A re-estimate of the protosolar 2H/1H)p ratio from 3He/4He) solar wind measurements. *Astron. Astrophys.* **323**, L9-L12.
- Gibbard S. G., Macintosh B., Gavel D., Max C. E., de Pater I., Ghez A. M., Young E. F. and McKay C. P. (1999) Titan: High-Resolution Speckle Images from the Keck Telescope. *Icarus* **139**, 189-201.
- Gillett F. C. (1975) Further observations of the 8-13 micron spectrum of Titan. *Astrophys. J.* **201**, L41-L43.
- Gillett F. C., Forest W. J. and Merrill K. M. (1973) 8-13 micron observations of Titan. *Astrophys. J* **194**, L93-L95.
- Grard R., Svedhem H., Brown V., Falkner P. and Hamelin M. (1995) An Experimental Investigation of Atmospheric Electricity and Lightning Activity to be Performed During the Descend of the Huygens Probe onto Titan. *J. Atmos. Terr. Phys.* **57**, 575-585.
- Grasset O. and Sotin C. (1996) The cooling rate of a liquid shell in Titan's interior. *Icarus* **123**, 101-112.
- Griffith C. A., Owen T., Miller G. A. and Geballe T. (1998) Transient clouds in Titan's lower atmosphere. *Nature* **395**, 575-578.
- Griffith C. A., Owen T. and Wagener R. (1991) Titan's Surface and Troposphere, Investigated with Ground-Based, Near-Infrared Observations. *Icarus* **93**, 362-378.
- Griffith C. A. and Zahnle K. (1995) Influx of cometary volatiles to planetary moons: the atmospheres of 1000 possible Titans. *J. Geophys. Res.* **100**, 16907-16922.
- Grigorovici R., Stoica T. and Vancu A. (1982) Evaluation of the optical constants and thicknesses of weakly absorbing non-uniform thin films. *Thin Solid Films* **97**(2), 173-185.
- Gupta S., Ochiai E. and Ponnampereuma C. (1981) Organic synthesis in the atmosphere of Titan. *Nature* **293**, 725-727.
- Hanel R., Conrath B., Flasar F. M., Kunde V., Maguire W., Pearl J., Pirraglia J., Samuelson R., Herath L., Allison M., Cruikshank D., Gautier D., Gierasch P., Horn L., Koppany R. and

- Ponnamperuma C. (1981) Infrared Observations of the Saturnian System from Voyager 1. *Science* **212**, 192-200.
- Hunten D. M., Tomasko G., Flasar F. M., Samuelson R. E., Strobel D. F. and Stevenson D. J. (1984) Titan. In *Saturn* (eds. T. Gehrels and M. S. Matthews), pp. 671-759. The University of Arizona Press, Tucson, Arizona.
- Huntress W. T. (1977) *Astrophys. J. Suppl.* **33**, 495-514.
- Hummel R. W. (1970) Initial yield of ethylene from the radiolysis of methane. *Int. J. Radiat. Phys. Chem.* **2**, 119-122.
- Ivanov B. A., Basilevsky A. T. and Neukum G. (1997) Atmospheric entry of large meteoroids: implication to Titan. *Lunar and Planetary Science Conf.* **XX**.
- Jones T. D. and Lewis J. S. (1987) Estimated impact shock production of N₂ and organic compounds on early Titan. *Icarus* **72**(381-393).
- Khanna R. K., Perera-Jarmer M. A. and Ospina M. J. (1987) Vibrational infrared and Raman spectra of dicyanoacetylene. *Spectrochim. Acta* **43A**, 421-425.
- Khare B. N., Sagan C., Arakawa E. T., Suits F., Callcott T. A. and Williams M. W. (1984) Optical Constants of Organic Tholins Produced in a Simulated Titanian Atmosphere: From Soft X-Ray to Microwave Frequencies. *Icarus* **60**, 127-137.
- Kouvaris L. C. y Flasar F. M. (1991) Phase Equilibrium of Methane and Nitrogen at Low Temperatures: Application to Titan. *Icarus* **91**(1991), 112-124
- Kuiper G. P. (1944) Titan: A satellite with an atmosphere. *Astrophys. J.* **100**, 378.
- Latham J., Stromberg I. M. (1977) Point discharge. In *Lightning* vol. 1, ed. R. H. Golde, Academic Press, London, 99-117.
- Lecluse C., robert F., Gautier D. and Guirand M. (1996) Deuterium enrichment in giant planets. *Planet. Space Sci.* **44**, 1579-1592.
- Lellouch E., Cousténis A., Gautier D., Raulin F., Dubouloz N. y Frère C. (1989) Titan's Atmosphere and Hypothesized Ocean: A Reanalysis of the Voyager I Radio-occultation and IRIS 7.7 μm data. *Icarus* **79**, 328-349.
- Lemmon M. T., Karkoschka E. and Tomasko M. (1993) Titan's rotation: surface feature observed. *Icarus* **103**, 329-332.
- Lemmon M. T., Karkoschka E. and Tomasko M. (1995) Titan's Rotational Light-Curve. *Icarus* **113**, 27-38.
- Lindal G. F., Wood G. E., Hotz H. B., Sweetnam D. N., Eshleman V. R. and Tyler G. L. (1983) The Atmosphere of Titan: an Analysis of the Voyager 1 Radio Occultation Measurements. *Icarus* **53**, 348-363.
- Lorenz R. D. (1993) The life, death and afterlife of a raindrop on Titan. *Planet. Space Sci.* **41**(9), 647-655.

- Lorenz R. D. (1997) Impacts and cratering on Titan: a pre-Cassini view. *Planet. Space Sci.* **45**(8), 1009-1019.
- Lorenz R. D., Lunine J. I. and McKay C. P. (1997) Titan under a red giant Sun: a new kind of "habitable moon". *Gephys. Res. Lett.* **24**, 2905-2908.
- Lunine J. I. (1993) Does Titan have an ocean? A review of current understanding of Titan's surface. *Rev. Geophys.* **31**(2), 303 -.
- Lunine J. I., Lorenz R. D. and Hatmann W. K. (1998) Some speculations on Titan's past, present and future. *Planet. Space Sci.* **46**(9/10), 1099-1107.
- Lunine J. I., Stevenson D. J. and Yung Y. (1983) Ethane ocean on Titan. *Science* **222**, 1229-1230.
- Lutz B. L., De Bergh C. and Owen T. (1983) Titan: discovery of carbon monoxide in its atmosphere. *Science* **220**, 1374-1375.
- Maxwell-Garnett J. C. (1904) *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A* **203**, 385-.
- McKay C. P. (1996) Elemental composition, solubility and optical properties of Titan's organic haze. *Planet. Space Sci.* **44**(8), 741-747.
- McKay C. P., Pollack J. B. and Courtin R. (1989) The Thermal Structure of Titan's Atmosphere. *Icarus* **80**, 23-53.
- McKay C. P., Pollack J. B. and Courtin R. (1991) The greenhouse and antigreenhouse effects on Titan. *Science* **253**, 1118-1121.
- McKay C. P. and Toon O. B. (1992) Titan's organic haze. In *Proceedings, Symposium on Titan*, pp. 185-190. ESA SP-338.
- Molina-Cuberos G. J., López-Moreno J. J., Rodrigo R., Lara L. M. and O'Brian K. (1999) Ionization by cosmic rays of the atmosphere of Titan. *Planet. Space Sci.* **47**, 1347-1354.
- Morrison D., Owen T. and Soderblom L. A. (1986) The Satellites of Saturn. In *Satellites* (eds. J. A. Burns and M. S. Matthews), pp. 764-801. The University of Arizona Press, Tucson, Arizona.
- Muhleman D. O., Grossman A. W., Butler B. J. and Slade M. A. (1991) Radar reflectivity of Titan. *Science* **248**, 975-980.
- Navarro-González R. and Ramírez S. I. (1997) Corona Discharge of Titan's Troposphere. *Adv. Space Res.* **19**(7), 1121-1133.
- Neff J. S., Humm D. C., Bergstralh J. T., Cochran A. L., Cochran W. D., Barker E. S. and Tull R. G. (1984) Absolute Spectrophotometry of Titan, Uranus, and Neptune: 3500-10,500 Å. *Icarus* **60**, 221-235.
- Orton G. S. (1992) Ground-based observations of Titan's thermal spectrum. In *Proceedings Symposium on Titan* (ed. ESA Publications Division), pp. 81-85. ESTEC, Noordwijk, Netherlands, Toulouse, France.
- Owen T. (1982) The composition and origin of Titan's atmosphere. *Planet. Space Sci.* **30**, 833-838.

- Pinto J. P., Lunine J. I., Kim S.-J. and Yung Y. L. (1986) D to H ratio and the origin and evolution of Titan's atmosphere. *Nature* **319**, 388-390.
- Rages K. and Pollack J. B. (1980) Titan's aerosols: Optical Properties and Vertical Distribution. *Icarus* **41**, 119-130.
- Rages K. A. and Pollack J. B. (1983) Vertical distribution of scattering hazes in Titan's upper atmosphere. *Icarus* **55**, 50-62.
- Ramírez Jiménez S. I. (1998) Estudio experimental de los procesos de descargas corona en la troposfera de Titán. Maestría thesis. UNAM, México, D. F.
- Rannou P., Cabane M., Chassefière E., Botet R., McKay C. P. and Courtin R. (1995) Titan's Geometric Albedo: Role of the Fractal Structure of the Aerosols. *Icarus* **118**(2), 355-372.
- Sagan C. and Dermott S. F. (1982) The tides in the seas of Titan. *Nature* **300**(5894), 731-733.
- Sagan C. and Thompson W. R. (1984) Production and Condensation of Organic Gases in the Atmosphere of Titan. *Icarus* **59**, 133-161.
- Sagan C., Thompson W. R. and Khare B. N. (1992) Titan: A Laboratory for Prebiological Organic Chemistry. *Acc. Chem. Res.* **25**(7), 286-292.
- Samuelson R. E. (1970) Non-local thermodynamic equilibrium in cloudy planetary atmospheres. *J. Atmos. Sci.* **27**, 711-720.
- Samuelson R. E. (1983) Radiative Equilibrium Model of Titan's Atmosphere. *Icarus* **53**, 364-387.
- Samuelson R. E., Hanel R. A., Kunde V. G. and Maguire W. C. (1981) Mean molecular weight and hydrogen abundance of Titan's atmosphere. *Nature* **292**, 688-693.
- Samuelson R. E. and Mayo L. A. (1991) Thermal Infrared Properties of Titan's Stratospheric Aerosol. *Icarus* **91**, 207-219.
- Samuelson R. E. and Mayo L. A. (1997) Steady-state model for methane condensation in Titan's troposphere. *Planet. Space Sci.* **45**(8), 949-958.
- Samuelson R. E., Nath N. R. and Borysow A. (1997) Gaseous abundances and methane supersaturation in Titan's troposphere. *Planet. Space Sci.* **45**(8), 959-980.
- Savoie R. and Fournier R. P. (1970) Far-infrared spectra of condensed methane and methane-d₄. *Chem. Phys. Lett.* **7**, 1-3.
- Scattergood T. W., McKay C. P., Borucki W. J., Giver L. P., Van Ghysseghem H., Parris J. E. and Miller S. L. (1989) Production of Organic Compounds in Plasmas: a Comparison among Electric Sparks, Laser-Induced Plasmas, and UV light. *Icarus* **81**, 413-428.
- Smith P. H., Lemmon M. T., Lorenz R. D., Sromovsky L. A., Caldwell J. J. and Allison M. D. (1996) Titan's surface revealed by HST imaging. *Icarus* **119**, 336-349.
- Socrates G. (1994) *Infrared group frequencies*. John Wiley & Sons, Ltd., England.
- Stevenson D. J. (1982) Volcanism and igneous processes in small icy satellites. *Nature* **298**, 142-144.

- Stevenson D. J. (1992) Interior of Titan. In *Proceedings Symposium on Titan*, pp. 29-33. ESA Publication Division, Toulouse, France.
- Stevenson D. J. and Potter B. E. (1986) Titan's latitudinal temperature distribution and seasonal cycle. *Geophys. Res. Lett.* **17**, 93-96.
- Strobel D. F. and Shemansky D. E. (1982) EUV Emission from Titan's Upper Atmosphere: Voyager 1 Encounter. *JGR* **87**(A3), 1361-1368.
- Strobel D. F., Hall D. T., Zhu X. y Summers M. F. (1993) Upper Limit on Titan's Atmospheric Argon Abundance. *Icarus* **103**, 333-336
- Swanepoel R. (1984) Determination of roughness and optical constants of inhomogeneous amorphous silicon films. *J. Phys. E* **17**(10), 896-903.
- Taylor F. W. and Cousténis A. (1998) Titan in the Solar System. *Planet. Space Sci.* **46**(9/10), 1085-1097.
- Thompson W. R., Henry T. J., Schwartz J. M., Khare B. N. and Sagan C. (1991) Plasma Discharge in $N_2 + CH_4$ at Low Pressures: Experimental Results and Applications to Titan. *Icarus* **90**, 57-73.
- Tomasko M. G., Doose L. R., Smith P. H., West R. A., Soderblom L. A., Combes M., Bézard B., Cousténis A., deBergh C., Lellouch E., Rosenqvist J., Saint-Pé O., Schmitt B., Keller H. U., Thomas N. and Glien F. (1997) The Descent Imager / Spectral Radiometer (DISR) Aboard Huygens. In *Huygens: Science, Payload and Mission* (ed. A. Wilson), pp. 109-138. ESA Publication Division, Noordwijk, The Netherlands.
- Toon O. B., McKay C. P., Courtin R. and Ackerman T. P. (1988) Methane Rain on Titan. *Icarus* **75**, 255-284.
- Toon O. B., McKay C. P., Griffith C. A. and Turco R. P. (1992) A Physical Model of Titan's Aerosols. *Icarus* **95**, 24-53.
- Tomasko and Smith (1982) *Icarus* **51**, 65-95.
- Uman M. A. (1987) *The Lightning Discharge*. Academic Press Inc., Orlando FL.
- Uman M. A. and Krider E. P. (1989) Natural and Artificially Initiated Lightning. *Science* **246**, 457.
- Vonnegut B. (1953) Possible Mechanism for the Formation of Thunderstorm Electricity. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **34**, 378.
- Yung Y. L., Allen M. and Pinto J. P. (1984) Photochemistry of the Atmosphere of Titan: Comparison between Model and Observations. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **55**, 465-506.