

Como en el caso anterior se deja en la platina caliente o estufa a 50°-60° durante varias horas y luego se elimina el exceso de glicerina-gelatina en los bordes como ya fue explicado.

Con un poco de práctica se consigue estimar con facilidad la cantidad de medio a colocar para obtener un preparado relativamente delgado y con una apropiada dispersión de las partículas orgánicas.

### PREPARACIONES ANTIGUAS

El tratamiento con formol puede resultar también muy útil en el caso de preparaciones ya realizadas y que muestran signos de alteración o que se desee fijar para mayor seguridad futura.

En estos casos basta colocar con un pincel suficiente cantidad de formol comercial sobre los bordes del preparado y dejarlo en posición horizontal durante 10 a 15 minutos. Luego con un trozo de papel de filtro eliminar el exceso de formol y dejar secar a temperatura ambiente durante 24 horas.

Si la preparación estaba bordeada con alguna laca, hay que eliminar parte de ésta para que el formol entre en contacto con la glicerina-gelatina.

Si bien el formol no penetra en toda la masa del medio de montaje, endurece y fija suficientemente los bordes del mismo como para evitar futuras alteraciones o desplazamientos.

Es común que por este tratamiento se formen en los bordes del preparado, pequeñas entradas dendriformes que por lo general solo afectan una superficie de  $\frac{1}{2}$  a 1 mm de ancho.

### BIBLIOGRAFIA

- Erdtman, G., 1952. Pollen morphology and plant taxonomy. Angiosperms. An introduction to Palynology I. Almqvist and Wiksell, Stockholm, 539 pp.
- Langeron, M., 1949. Précis de Microscopie. Masson et Cie, Paris, 1430 pp.



## RECIENTES ENFOQUES DE LA GEOQUIMICA ORGANICA Y LA PALINOLOGIA APLICADOS A ESTUDIOS SOBRE GENESIS Y EXPLORACION DE PETROLEO Y CARBON

por HECTOR J. VILLAR\* y SERGIO ARCHANGELSKY\*\*

**ABSTRACT:** Sources of organic matter along geological time and conditions of accumulation and its transformation in sediments are described. Methods for evaluation of petroleum source rocks based on palynology and organic geochemistry are discussed. The genesis and evolution of coal is analyzed and paralleled with oil formation. Some parameters are given for determination of coal rank and the rank stages are compared with the maturation levels of dispersed organic matter.

### INTRODUCCION

En años recientes muchas disciplinas geológicas y biológicas han experimentado una marcada evolución. Por una parte se han desarrollado nuevas técnicas basadas en instrumentales cada vez más sofisticados que abrieron nuevos campos de investigación. Por otra, se han superado los límites inherentes a cada especialidad y se ha comenzado a trabajar de manera integrada con otras disciplinas en la búsqueda de metas comunes. El esfuerzo realizado por equipos interdisciplinarios amplió sustancialmente los horizontes consiguiéndose logros no sospechados. Si bien esto se ha logrado parcialmente por el esfuerzo de investigadores que respondían a las usuales inquietudes intelectuales, no es menos cierto que los requerimientos cada día más urgentes para dar solución a problemas prácticos han tenido una influencia decisiva; a tal punto que estamos asistiendo a un rápido avance de la investigación aplicada a la resolución de tales problemas.

La Paleontología ha sido considerada tradicionalmente como una "ciencia pura", es decir que las investigaciones de los fósiles no pasaban de meras descripciones sistemáticas y especulaciones filogenéticas; sin embargo la aplicación de tales estudios en la Estratigrafía fue siempre decisiva y la solución de problemas paleoecológicos, paleoclimáticos y paleogeográficos ha contado siempre con el apoyo de la Paleontología. Las condiciones de vida de los organismos en el pasado y su transformación luego del soterramiento han sido estu-

\* Miembro de la Carrera del Personal de Apoyo del CONICET, Centro de Investigaciones en Recursos Geológicos (CIRGEO). Unidad Paleobotánica y Palinología.

\*\* Miembro de la Carrera del Investigador del CONICET, Centro de Investigaciones en Recursos Geológicos (CIRGEO). Unidad Paleobotánica y Palinología.

diadas con una creciente intensidad en los últimos decenios. Todas estas orientaciones utilizan los fósiles como medio para llegar a conclusiones finales que no son estrictamente paleontológicas. También se conocía la utilidad de los fósiles como acumulación de depósitos biogénicos, es decir que los restos de los organismos eran útiles para las industrias humanas. Posiblemente haya sido el carbón el más estudiado por los paleontólogos: en tal sentido la Paleobotánica ha tenido siempre relación directa con este elemento y no es de extrañar que los pioneros de esta disciplina han estado vinculados con la industria del carbón. Con el desarrollo de técnicas de observación se propusieron diversas clasificaciones de los elementos constitutivos del carbón a la par que se estudiaba su génesis. Con ello se produjo un acercamiento de paleontólogos y bioquímicos que se fue estrechando con el correr de los años. Independientemente, la industria petrolera hace escasamente 30 años enrolaba en sus equipos de investigación a numerosos paleopalinólogos, primariamente para solucionar problemas estratigráficos, y luego paleoecológicos y paleogeográficos. En estas últimas décadas se produjo un decisivo acercamiento entre los paleopalinólogos y los químicos, especialmente desde el momento en que se comprendió que el petróleo era de origen esencialmente orgánico y que giraba en torno a los elementos C y H. En este último decenio, los paleopalinólogos comenzaron a prestar cada vez mayor atención a todos los restos orgánicos que hallaban en sus preparados microscópicos; estos restos, resistentes a la acción de los ácidos clorhídrico y fluorhídrico (usados para la disgregación de las rocas) son en gran parte de origen vegetal, tanto terrestres como acuáticos (de aguas dulces y saladas). Surgió la denominación de Palinofacies (Combaz, 1964) para caracterizar los variados espectros de la materia orgánica observable en un preparado microscópico. Experimentos de laboratorio permitieron confirmar que la temperatura era un factor importante para una buena preservación de los palinomorfos, los que con valores de 150°-200° C se oscurecían, perdían sus principales rasgos esculturales y finalmente se destruían. Se dedujo entonces que el color de los palinomorfos podía indicar aproximadamente las máximas paleotemperaturas a que el sedimento portador fue sometido desde el momento de la fosilización hasta la actualidad. Se establecieron así índices de alteración térmica que fueron prestamente utilizados en la búsqueda de capas con posible generación. Simultáneamente se avanzó en los estudios de la química del carbón llegándose, en nuestros días, a una interrelación de los trabajos que efectúan los paleopalinólogos y los químicos.

A nadie escapa la afligente situación generada por el déficit de petróleo que se producirá en los próximos decenios. Es coincidente esta etapa con el rápido desarrollo científico sobre el origen y ocurrencia del petróleo. Los más recientes tratados sobre el tema presentan un enfoque totalmente novedoso, basado en los resultados de los avances de la Química orgánica por una parte y de la Paleobotánica por otra. Nuestro país no es poseedor de grandes reservas de hidrocarburos, pero tiene una razonable perspectiva para el futuro más cercano. Por otra parte, poseemos también depósitos de carbón, que habrán de sustituir al petróleo por un cierto tiempo.

El objeto del presente artículo interdisciplinario es el de presentar, de una manera sintética, los principios fundamentales sobre la materia orgánica que forma los depósitos de carbón y petróleo, a modo de orientación para los jóvenes universitarios, especialmente geólogos y paleontólogos, quienes podrán tener una guía que quizás sea de utilidad en sus futuros trabajos.

## FUENTES DE LA MATERIA ORGANICA

La vida en nuestro planeta comenzó según los testimonios que poseemos, hace más de tres mil millones de años. Desde esa lejana época hay pues formación de biomasa, pero recién en los últimos 500 millones de años tenemos registros continuos y acumulaciones importantes desde un punto de vista económico. Originalmente la vida se desarrolló en las aguas marinas mientras que recién hacia el Silúrico aparecen los primeros testimonios de vegetales terrestres que en el Devónico logran diversificarse y ocupar variados nichos ecológicos. El éxito de los vegetales en la conquista terrestre se debió a la presencia de suficiente anhídrido carbónico en la atmósfera para que se produjera la fotosíntesis, que es la base para una masiva producción de materia orgánica<sup>1</sup>. Esta producción fue iniciada por los más primitivos organismos autótrofos (bacterias fotosintéticas y algas Cianofíceas o azul-verdosas) poseedores de clorofila.

Con el aumento de organismos fotosintéticos, se incrementó el contenido de oxígeno en la atmósfera y por lo tanto, también subió en proporción el anhídrido carbónico. Esta cadena fue modificada por lo menos en dos ocasiones, a fines del Paleozoico y Mesozoico, cuando se registraría una sensible disminución de oxígeno en la atmósfera aparejando importantes cambios en la constitución de las floras y faunas terrestres.

La materia orgánica producida se destruye fácilmente por muy variadas causas y se estima que su rango de preservación durante la historia geológica es menor al 0.1 % en peso expresado como carbono orgánico; en casos especiales, este valor asciende hasta un máximo de 4 %. La preservación de los restos fosilizados de la biomasa del pasado geológico ha sido de capital importancia para la formación de rocas carbonosas o rocas generadoras de hidrocarburos.

En general, desde el Precámbrico y hasta el Devónico la materia orgánica se producía a partir de bacterias y fitoplancton marino, algas bentónicas y zooplancton. Desde el Devónico, las plantas terrestres contribuyen también a la formación de biomasa, especialmente las arborescentes. De tal manera los distintos grupos de fósiles que participaron en la formación de materia orgánica en ambientes marinos serían las bacterias, hongos, algas, acritarcos, dinoflagelados y quitinozoarios. Todos ellos suelen hallarse como microfósiles y son unicelulares o multicelulares, pero siempre microscópicos. En

<sup>1</sup> El término materia orgánica comprende solamente a material con moléculas orgánicas, con forma de monómeros o polímeros, derivada directa o indirectamente de las partes orgánicas de los organismos. Se excluyen las partes minerales de los organismos.

cambio, en ambientes no marinos, los grupos que participan en la formación de la biomasa serían, por una parte también las bacterias, hongos y algas, pero por otra restos de órganos o tejidos de plantas superiores: polen, esporas y restos vegetales (traqueidas, cutículas, membranas, resinas, etc.). De estos datos se desprende que prácticamente el grueso de la biomasa con materia orgánica formadora de carbón o generadora de hidrocarburos es de origen vegetal y de allí que el estudio de las plantas fósiles (Paleobotánica y Paleopalínología) tiene vinculación directa con estas rocas combustibles, pues forman parte o han originado las mismas.

Entre las plantas terrestres, podemos señalar que en general el grueso de la vegetación era pteridofítica durante el Paleozoico superior, gimnospérmica en el Mesozoico y angiospérmica en el Cenozoico. Durante el Carbónico medio al Pérmico inferior se desarrolló una exuberante vegetación que en la Franja Ecuatorial motivó la formación de importantes depósitos carbonosos. Si bien las plantas con gran desarrollo de leño secundario ya se conocían, tejidos corticales rígidos proporcionaban el sostén a numerosos árboles de grandes Licópsidas que formaban enormes acumulaciones. Grandes Calamites eran compañeros de asociación en los ambientes francamente higrófilos mientras que en ambientes mesófilos circundantes se desarrollaban vegetales más pequeños, Pteridospermas y Filicópsidas. Grandes Cordaitales existían tanto en ambientes higrófilos como mesófilos y aún xerófilos. Todas estas plantas eran buenas productoras de polen y esporas que se depositaban en ambientes circundantes, a veces al lado de la planta madre. Durante el Mesozoico, dominan las Gimnospermas, desde las Pteridospermas en el Triásico a las Bennettitales en el Jurásico-Cretácico. También entre los grandes y medianos árboles encontramos Cycadales, Ginkgoales y Pteridofitas, especialmente helechos. El tipo de materia vegetal fue básicamente el mismo pero procedente de otros grupos taxonómicos. Hacia el Jurásico superior y en el Cretácico inferior, nuevamente se establece una vegetación exuberante pero esta vez en un área más amplia. La uniformidad composicional de las paleofloras sugiere un largo lapso de acumulación de materia orgánica en condiciones climáticas buenas (posiblemente por ello es que hay una buena cantidad de yacimientos petrolíferos con sedimentitas generadoras de esa antigüedad). Nuevamente se produce un cambio paleoflorístico hacia fines del Mesozoico y aparece el nuevo grupo de las Angiospermas que ocupa casi todos los nichos ecológicos, quedando las Gimnospermas y Pteridofitas relegadas a un plano más discreto. También en esta época, los componentes de la materia orgánica terrestre son similares pero los grupos taxonómicos han cambiado.

Si bien los vegetales pueden clasificarse en acuáticos y terrestres, la acumulación de la materia orgánica se produce en medios acuáticos, y fundamentalmente en los grandes niveles de base (mares y océanos). Por lo tanto la participación de los vegetales terrestres suele ser alóctona en las áreas de sedimentación y tales restos se mezclarán con los autóctonos. En cuerpos de agua continentales (grandes lagos, pantanos, etc.), puede producirse la acumulación de una mayor cantidad de material terrestre con respecto al fitoplancton autóctono dando como resultado un depósito de materia orgánica

nea rica en celulosa y lignina. En los océanos, se ha establecido que actualmente la mayor productividad de materia orgánica se registra en las áreas de plataforma continental (con un 7.5 % del total de los fondos marinos). A esas áreas se suman las partículas orgánicas continentales traídas por las aguas (ríos, deltas) o por aire. Las áreas con desarrollo de albuferas y otros tipos de cuerpos de agua costeros, son particularmente importantes y desarrollan una gran actividad biológica. Ciertos mares cerrados, también tienen importantes depósitos de materia orgánica (Mar Negro). La mayor o menor participación de material terrestre (plantas superiores), modifica la composición química de los depósitos de materia orgánica. La materia orgánica del fitoplancton marino tiene una composición química de proteínas (50 % o más), lípidos (5-25 %) y carbohidratos (no más del 40 %); en cambio las plantas terrestres presentan celulosa (30-50 %) y lignina (15-25 %) que son elementos necesarios para la formación de tejidos de sostén (y que las acuáticas no necesitan).

#### ACUMULACION DE LA MATERIA ORGANICA

La acumulación y preservación de la materia orgánica en sedimentos está prácticamente restringida a ambientes acuáticos, y está controlada, en primera aproximación, por todos aquellos procesos que de una manera u otra retardan o aceleran su oxidación.

En las aguas oceánicas, la materia orgánica existe fundamentalmente bajo dos formas: disuelta o fragmentada. Su concentración total depende, por supuesto, de la productividad primaria del ambiente en cuestión, de la magnitud del aporte de material alóctono y de la relación entre el aporte de sustancias orgánicas y sustancias minerales. Sin embargo, esta relación, y por lo tanto la cantidad de materia orgánica acumulada en el sedimento, se ve modificada por un factor determinante: la concentración de oxígeno disuelto en las aguas. En las aguas oxigenadas los procesos oxidativos bacterianos y de otros microorganismos destruyen los compuestos orgánicos más frágiles; en condiciones extremas, la oxidación puede completarse totalmente a dióxido de carbono, agua, nitratos, etc. Bajo situaciones de deficiencia o ausencia de oxígeno la destrucción prosigue, pero a velocidad menor y sin oxidación total, debido a la acción de bacterias anaerobias; los compuestos orgánicos son degradados en forma incompleta y los más resistentes alcanzan el fondo y se incorporan al sedimento (Barker, 1979).

La cantidad de materia orgánica que finalmente se incorpora al sedimento está regulada además, por otros dos factores (Tissot et al., 1978):

a) tamaño y velocidad de sedimentación de las partículas minerales: un pequeño tamaño favorece la adsorción de la materia orgánica, dificultando su degradación biológica y favoreciendo un descenso más rápido a lo largo de la columna de agua. Por otro lado, una alta velocidad de sedimentación de las partículas minerales provoca un efecto de dilución de la materia orgánica, mientras que una baja velocidad la deja expuesta a los procesos destructivos. Una acumulación óptima se produce por lo tanto, a una velocidad intermedia de depositación de partículas de grano fino;

b) nivel de energía del cuerpo de agua: si éste es muy alto ocurre erosión en lugar de sedimentación y además el tamaño del grano mineral resulta muy grueso para retener la materia orgánica. Si el nivel de energía es muy bajo, el aporte es escaso y por lo tanto también la acumulación. Obviamente, la situación ideal se da en aguas relativamente calmas.

## TRANSFORMACION DE LA MATERIA ORGANICA

Las transformaciones químicas y fisicoquímicas de la materia orgánica posteriores a su sedimentación y acumulación obedecen en una primera etapa a procesos estrictamente biológicos y químicos, en la cual los compuestos orgánicos son convertidos en querógeno, un complejo aún no definido claramente por geoquímicos y organopalinólogos; en una segunda etapa, caracterizada por la dominancia de procesos geoquímicos, la temperatura y en menor medida la presión, juegan el rol principal (Staplin, 1969).

El conjunto de estos procesos afecta en distinta forma a los compuestos de variada reactividad contenidos en la materia orgánica y conduce a la formación de sustancias más estables bajo nuevas condiciones de equilibrio. A lo largo de estas transformaciones, el total de la materia orgánica evoluciona hacia la producción de dos tipos de residuos: uno rico en carbono y otro rico en hidrógeno (hidrocarburos y compuestos relacionados); los productos finales de esta transformación, siempre y cuando se den las condiciones para que la misma se complete, son grafito (C) y metano (CH<sub>4</sub>).

Desde el punto de vista de los niveles de evolución de la materia orgánica (ver fig. 1), pueden distinguirse según Tissot et al. (1978), tres estadios de transformación:

### I. Diagénesis

Es un proceso que ocurre normalmente a una profundidad no mayor de unos cientos de metros y trae aparejado importantes cambios en la composición química de la materia orgánica depositada, como así también la consolidación del sedimento. Las transformaciones son producidas por acciones microbiana y química, bajo condiciones suaves, con ninguna o muy poca intervención de la temperatura y la presión, y provocan la destrucción de los biopolímeros originales y la formación de un nuevo tipo de compuestos químicos, sin estructura definida: los geopolímeros, que como se verá más adelante, junto con algunas estructuras que se han conservado parcialmente (esporas, polen, restos vegetales) y otras que lo han hecho en forma casi total (ciertas fracciones lipídicas) reciben el nombre genérico de querógeno.

Para analizar los cambios que se llevan a cabo en la materia orgánica en el proceso diagenético, conviene dividir a éste en dos fases: la primera caracterizada por una importante degradación bioquímica, y a continuación una segunda en la que los restos orgánicos sufren policondensaciones sucesivas y una insolubilización creciente.

La degradación bioquímica es consecuencia de una actividad microbiana intensa, fundamentalmente bacteriana: los compuestos orgánicos son metabolizados para obtener energía o utilizados con fines sintéticos. En los pri-

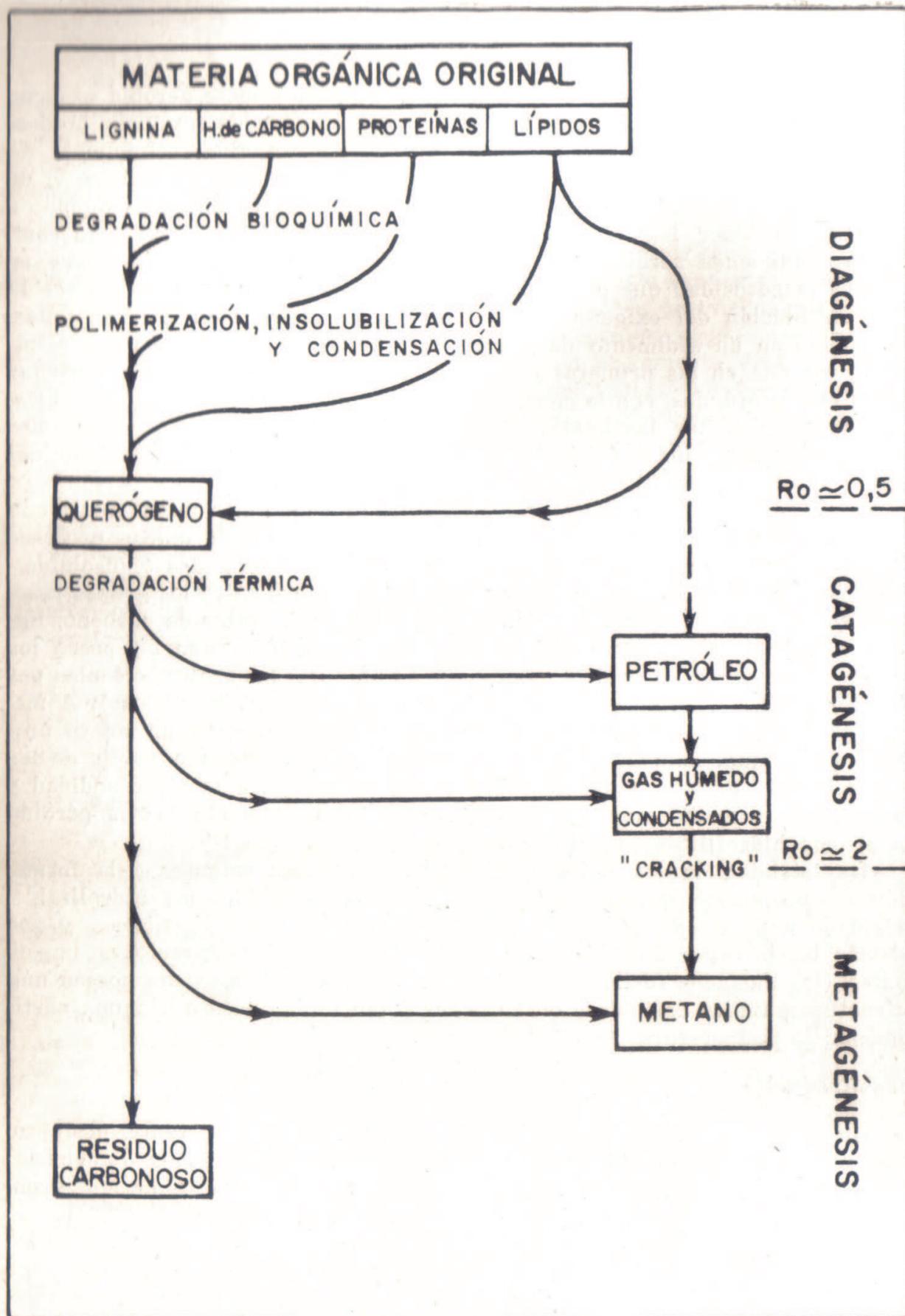


Fig. I. — Proceso de transformación de la materia orgánica: Sus estadios de evolución y zonas de generación de hidrocarburos. (Adaptado de Tissot et al., 1978.)

meros centímetros de sedimento la actividad es básicamente aerobia y, como ya se mencionó, en ambientes altamente oxidantes puede producir la destrucción total de la materia orgánica. A mayor profundidad, el número de bacterias aerobias decrece mucho más rápidamente que lo que lo hace el de anaerobias, debido a una disminución de la concentración de oxígeno, y comienzan a tener importancia los procesos fermentativos. Para este cambio de condiciones aerobias a anaerobias en la interfase sedimento-agua es decisiva la porosidad que presenta el sedimento, pues uno poroso favorece la libre circulación del oxígeno y las posibilidades de anaerobiosis son nulas. En cambio en un sedimento de grano fino, el oxígeno se consume por respiración aerobia en las primeras capas y se establecen condiciones anaerobias en las más profundas, con la consecuente preservación de la materia orgánica.

Las razones por las cuales cesan los procesos degradativos anaerobios son poco claras: quizás falta de nutrientes adecuados o alta toxicidad del medio, provocada por el propio metabolismo bacteriano.

Los compuestos residuales producidos por la acción microbiana junto con los no utilizados, son las unidades que van a tomar parte de nuevos procesos químicos que conducen a estructuras altamente polimerizadas e insolubles. Estos polímeros se originan a partir de condensaciones entre los grupos reactivos de compuestos formados a partir de proteínas, hidratos de carbono, lignina y lípidos (exceptuando la fracción hidrocarbonada, que no posee los grupos funcionales adecuados, aunque puede unirse a las macromoléculas por uniones débiles del tipo puente hidrógeno o por adsorciones físicas). A medida que la policondensación se va completando, se verifica un nuevo proceso: la insolubilización de las macroestructuras formadas a partir de las etapas biodegradativas y de polimerización. Esto ocurre a una profundidad y en un tiempo mucho mayor, y químicamente se corresponde con la pérdida de grupos hidrofílicos superficiales.

La totalidad de los procesos diagenéticos conduce entonces a la formación de un complejo altamente polimerizado e insoluble, no hidrolizable, originado a partir de restos no asimilados por los microorganismos, y que además ha incorporado hidrocarburos biosintéticos sin alteraciones importantes (los llamados fósiles geoquímicos). Estos geopolímeros no poseen una estructura química definida y en su génesis han tenido poca o ninguna participación la temperatura y la presión.

## II. Catagénesis

Durante la catagénesis, y bajo una acción térmica importante, el querógeno pierde la estabilidad química alcanzada hacia el fin de la diagénesis; las transformaciones que en él se producen a lo largo de este estadio serán las responsables de la generación de hidrocarburos. (Durand et al., 1973).

Debido a la depositación continua de sedimentos, la materia orgánica ya sometida al proceso diagenético sufre un soterramiento creciente que llega a los varios miles de metros, alcanzando la temperatura y la presión valores entre los 50° a 150° C y 300 a 1.500 bares, respectivamente. El querógeno tiende a lograr un nuevo equilibrio termodinámico, y evoluciona hacia formas químicas más estables en estas condiciones.

Esta reestructuración, llamada comúnmente "maduración", se alcanza con el aumento progresivo de la temperatura, e involucra un enriquecimiento en carbono, ruptura de enlaces entre núcleos aromáticos, eliminación de grupos funcionales y una aromatización creciente. Todos estos cambios conducen a un grado de ordenamiento superior y más estable del querógeno, y es justamente a partir de la degradación térmica del mismo que se genera una fracción soluble cuantitativamente importante, rica en hidrógeno, cuyo peso molecular promedio disminuye y su carácter parafínico aumenta a medida que continúa el proceso de maduración; en condiciones adecuadas parte de esta fracción puede migrar y acumularse como petróleo crudo. Las variaciones en la composición química del querógeno con el aumento de la temperatura se traduce en cambios de sus características físicas. Los más notables son el cambio de color (desde traslúcido o amarillo pálido en muestras inmaduras a amarillo intenso en muestras maduras) y el aumento en el porcentaje de luz reflejada por la vitrinita (un componente leñoso del querógeno).

En cuanto a los hidrocarburos generados por las transformaciones operadas en el querógeno, los más importantes son alcanos, cicloalcanos de uno o dos anillos y aromáticos, de peso molecular bajo a medio. Estos compuestos que, salvo excepciones, no están presentes en organismos vivos, se forman solamente bajo las condiciones de temperatura adecuadas, y no presentan las características de las moléculas derivadas biológicamente.

La catagénesis es entonces, la principal zona de formación de petróleo, evolucionando, a medida que la temperatura se incrementa, hacia la formación de productos más livianos y finalmente hacia la zona de formación de gas ("gas húmedo" y luego metano).

### III. Metagénesis

El último estadio de evolución de la materia orgánica se alcanza a grandes profundidades, y como consecuencia de los altos valores de temperatura y presión, el querógeno completa su proceso de degradación térmica; los únicos productos presentes son metano y un residuo carbonoso con un orden molecular casi cristalino.

Desde el punto de vista de la prospección petrolera, esta etapa de transformación recibe el nombre de zona de "gas seco", donde puede llegar a haber algún tipo de generación residual de hidrocarburos, cuyo principal producto será metano, y donde los hidrocarburos ya generados son degradados y convertidos en gas.

## TIPOS Y CLASIFICACION DE LA MATERIA ORGANICA

En un capítulo anterior se ha mencionado una variedad de organismos vivos que constituyen las principales fuentes de la materia orgánica dispersa en sedimentos. Una clasificación de la misma es de gran importancia para poder relacionarla con las posibilidades de generación de hidrocarburos a través de los caminos evolutivos, ya que, debido a su composición química distinta, no todos los tipos reaccionan de la misma manera frente a los procesos térmicos catagénéticos, originando distintos productos finales.

Antes de entrar en una clasificación detallada de los tipos de materia orgánica, conviene definir lo que se entiende por querógeno, punto en el que aún no hay acuerdo total entre geoquímicos y palinólogos. Se lo define como la fracción de los constituyentes orgánicos de las rocas sedimentarias que es insoluble en solventes orgánicos. Abarca, en general, alrededor del 90 % del total de la materia orgánica, estando el 10 % restante constituido por bitumen (materia orgánica extraíble con solventes orgánicos y cuyos principales componentes son asfaltenos, resinas e hidrocarburos); su aislamiento se consigue por métodos químicos, disgregando la matriz mineral por tratamientos sucesivos con ácidos clorhídrico y fluorhídrico, o por métodos físicos mediante separación en un líquido de densidad alta (Marchand et al., 1968; Durand et al., 1973).

Existen distintos puntos de vista para definir los tipos de querógeno y su capacidad para actuar como material generador de petróleo o gas. Tissot (1975) lo clasifica en tres tipos, basándose en datos obtenidos mediante técnicas fisicoquímicas (composición elemental, espectrometría infrarroja, análisis termogravimétrico, microdifracción de electrones y resonancia paramagnética electrónica):

**Querógeno tipo I:** su contenido en lípidos es alto, fundamentalmente cadenas alifáticas. Por lo tanto, inicialmente tiene una alta H/C (razón atómica) y una baja O/C. Las estructuras aromáticas son escasas, y sometido a pirólisis a 600° C produce una alta cantidad de petróleo. Se supone que se origina a partir de acumulaciones de material derivado de algas o de materia orgánica que ha sufrido una biodegradación importante y retrabajamiento por microorganismos que la han enriquecido con su material lipídico.

Este tipo de materia orgánica, debido a su composición química, es considerada la de mayor capacidad de generación de petróleo; su presencia es muy poco frecuente.

**Querógeno tipo II:** la razón atómica de H/C es relativamente alta y la de O/C, baja. El contenido en estructuras aromáticas es mayor que en el tipo I y las cadenas alifáticas son más cortas pero abundantes; sometido a pirólisis, produce menos petróleo que el tipo I, pero en cantidad apreciable. Constituye la materia orgánica más frecuente en las rocas madres de petróleo y se la relaciona con sedimentos ricos en una mezcla de fitoplancton, zooplancton y bacterias, aunque algún aporte de material proveniente de vegetales superiores no es descartable.

**Querógeno tipo III:** es muy pobre en hidrógeno y rico en oxígeno; los núcleos poliaromáticos son numerosos y los constituyentes alifáticos, escasos. Su rendimiento en pirólisis es bajo. Deriva fundamentalmente de plantas terrestres y contiene restos vegetales identificables; su incorporación al sedimento puede haber sido directa o luego de haber pasado por una etapa previa de alteración. Su importancia como generador potencial de petróleo es casi nula; sin embargo, en condiciones adecuadas puede constituir la materia orgánica de rocas madres de gas.

Otro tipo de clasificación es la que propone Bujak et al. (1977), basada en criterios puramente morfológicos del querógeno al ser observado en luz transmitida, con cuatro categorías (ver fig. II):

**Amorfógeno:** todo aquel material orgánico sin estructura; que puede presentar un aspecto coloidal o estar finamente dividido.

**Firógeno:** material vegetal traslúcido de origen no leñoso; abarca cutículas, polen, esporas y quistes de dinoflagelados.

**Hilógeno:** material vegetal traslúcido fibroso de origen leñoso.

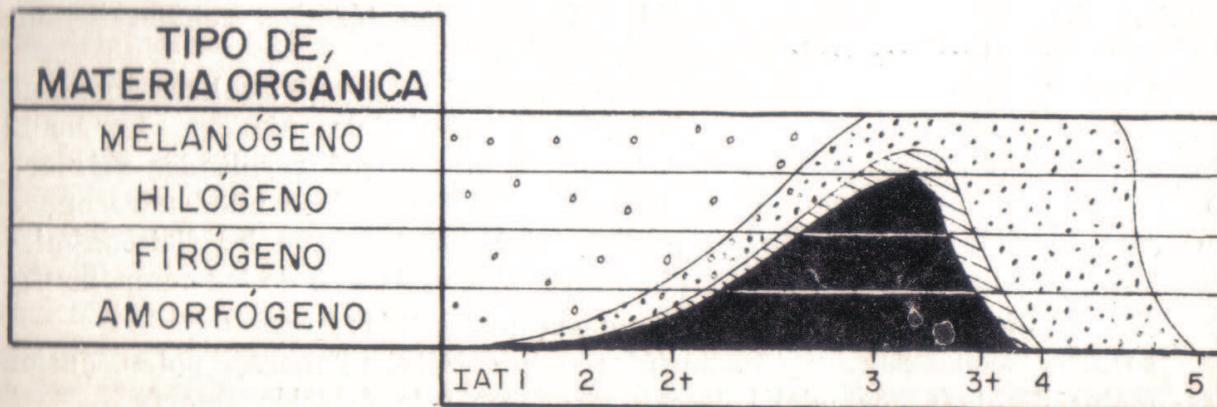
**Melanógeno:** todo material orgánico opaco (carbonoso).

En cuanto a la potencialidad para la formación de petróleo, el amorfógeno es el material con mayor capacidad generativa, siguiéndole en importancia el firógeno y luego el hilógeno; el potencial del melanógeno es nulo. Los cuatro tipos de querógeno, en un grado de evolución avanzado, son generadores de metano.

La correlación entre estas dos terminologías no es directa, pues los criterios utilizados son disímiles. En una primera aproximación, el querógeno tipo I abarcaría una fracción del amorfógeno; el tipo II, una fracción del amorfógeno y el firógeno; el tipo III, se correspondería con el hilógeno y melanógeno.

#### IDENTIFICACION DE ROCAS MADRES DE PETROLEO Y GAS

El reconocimiento de rocas generadoras de hidrocarburos se basa en la evaluación de tres características de la materia orgánica dispersa en esa



#### REFERENCIAS

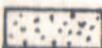
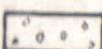
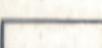
-  PETRÓLEO
-  GASES HÚMEDOS Y CONDENSADOS
-  METANO CATAGENÉTICO Y METAGENÉTICO
-  METANO BIOGÉNICO
-  TRAZAS DE METANO

Fig. II. — Tipos de materia orgánica e hidrocarburos generados según su nivel de evolución. (Adaptado de Bujak et al., 1977).

roca: la cantidad de materia orgánica presente, el tipo de querógeno y de materia orgánica soluble, y el grado de evolución del querógeno, que frecuentemente se conoce como grado de madurez térmica.

**Cantidad de materia orgánica.** Puede determinarse sobre el total (querógeno más bitumen) o sobre el querógeno sólo, previa extracción de la fracción soluble. La determinación puede realizarse de dos maneras: directamente sobre la materia orgánica, luego de eliminar los componentes minerales por sucesivos tratamientos con ácidos, o indirectamente como carbono orgánico midiendo la cantidad de dióxido de carbono formado por combustión en atmósfera de oxígeno, previa eliminación de carbonatos con ácido clorhídrico. La relación entre los valores de materia orgánica y carbono orgánico está dada por factores de conversión que tienen en cuenta tipo de querógeno y grado de evolución del mismo. (Forsman et al., 1958; Tissot et al., 1978).

En forma empírica, se estableció un valor del 0.5 % en peso de materia orgánica, equivalente a alrededor del 0.4 % en peso de carbono orgánico, como límite inferior para rocas madres de petróleo. Es éste un valor bastante optimista y algunos laboratorios lo colocan un tanto más arriba (hasta el 1 %). (Dow, 1977).

**Identificación del tipo de querógeno.** Es de suma importancia en el reconocimiento de rocas madres, pues, como ya se ha visto, poseen una composición química distinta y originan, sometidos a la acción térmica, compuestos que difieren en calidad y cantidad.

La distinción entre los tipos de querógeno se puede realizar mediante métodos ópticos microscópicos o mediante métodos fisicoquímicos. La combinación de estos dos grupos de métodos es la que otorga resultados más confiables, pues por separado tienen limitaciones: los ópticos pueden reconocer sólo una fracción de la materia orgánica total mientras que los fisicoquímicos atacan el problema como un todo, sin diferenciar cada uno de los componentes.

Las técnicas ópticas utilizadas normalmente son:

a) *Microscopía por luz transmitida*: se identifican esporas, polen, cutículas, restos de algas, material leñoso y carbonoso y la fracción amorfa.

b) *Microscopía por luz reflejada*: es ésta una técnica adaptada a partir de los métodos utilizados para el estudio de carbones. La investigación se realiza sobre un concentrado de partículas orgánicas pulidas y con microscopía de luz incidente. El reconocimiento del tipo de materia orgánica introduce una nueva terminología empleada para los macerales del carbón: liptinita (o exinita), relacionada con la fracción amorfa, algas, polen, cutículas y esporas; vitrinita, relacionada con las estructuras leñosas y parte de las fibras; inertinita, relacionada con las partículas carbonosas. La identificación mediante esta técnica no sólo se basa en la morfología de las partículas sino también en el poder reflector distinto de los tres macerales: bajo para liptinita, alto para inertinita, e intermedio para vitrinita. (Bostick., 1971). Sin embargo, el amorfógeno, uno de los tipos más interesantes en cuanto a su potencial generador de petróleo no es fácilmente identificable. Como se verá más adelante, la técnica de luz reflejada se emplea fundamentalmente para medir la madurez térmica de la materia orgánica.

Vale la pena mencionar el desarrollo que en los últimos años ha tenido la microscopía de fluorescencia de U. V. por luz reflejada (Van Gijzel, 1971; Ottenjam et al., 1975); este método permite identificar fácilmente aquellas fracciones que con luz reflejada normal se tornan poco reconocibles, es decir, justamente las relacionadas con altos potenciales generadores. La técnica, aunque reciente, parece ir convirtiéndose en un complemento importante de las otras dos mencionadas, no sólo en el reconocimiento del tipo de materia orgánica, sino también en la medición del grado de evolución.

Entre los métodos químicos y fisicoquímicos más eficientes para evaluar el tipo de querógeno, se encuentran el análisis elemental y las técnicas de pirólisis. El primero se basa en la caracterización mediante la determinación de las razones atómicas H/C y O/C. Con los métodos de pirólisis, se analizan las cantidades de dióxido de carbono, agua, hidrocarburos y compuestos similares, formados cuando se calienta la muestra gradualmente hasta unos 500°-600° C, en atmósfera inerte; con estos valores se obtiene lo que se conoce con el nombre de índice de oxígeno e índice de hidrógeno, y con ellos, el tipo de querógeno. (Espitalié et al., 1977).

Además de los métodos ópticos y químicos para caracterizar el tipo de materia orgánica basados en el análisis del querógeno, existen otros basados en la fracción soluble. Ellos sirven para diferenciar fundamentalmente la materia orgánica de origen marino de la de origen terrestre, mediante el análisis de los compuestos heredados sin modificaciones esenciales de los organismos originales. Sin embargo la eficiencia del método es relativa pues pueden producirse enmascaramientos, además de otras fuentes de error debidos a la movilidad del bitumen.

**Madurez térmica.** Las técnicas para evaluar el nivel de maduración son similares a las utilizadas en la identificación del tipo de querógeno, o sea: examen microscópico, análisis fisicoquímico del querógeno y análisis químico de la fracción soluble.

Las técnicas empleadas son:

a) *Microscopía por luz transmitida (carbonización de palinomorfos)*: la exina de los granos de polen y esporas de plantas actuales tiene en general una coloración amarillenta que en ocasiones puede llegar a ser anaranjada. Calentando paulatinamente las exinas a partir de la temperatura ambiente, el color amarillo comienza a oscurecerse hacia la gama de los pardos y cuando se llega a temperaturas de 200° C o mayores se vuelven marrones oscuras o francamente negras. Es pues posible establecer entre los 50° a 200° C una gama de colores que se valoriza a intervalos deseados. Sobre este principio se pueden hacer mediciones similares con los palinomorfos fósiles que deben recuperarse intactos, sin ser sometidos a tratamientos con reactivos que puedan alterar el color original. De tal forma es posible averiguar la máxima temperatura a que los sedimentos portadores de palinomorfos han sido sometidos desde su fosilización hasta la actualidad. Este parámetro se vincula con el grado de madurez térmica de la materia orgánica en general y permite tener una rápida aproximación en las determinaciones de paleotemperaturas.

Diferentes laboratorios usan distintos valores para el Índice de Alteración Térmica (= TAI o *Thermal Alteration Index*). En general las escalas se des-

arrollan entre 1 y 5 (ver fig. II), siendo 1 el valor para palinomorfos completamente traslúcidos y con muy débil coloración mientras que 5 corresponde a material opaco y negro. Entre los valores 2 y 4 se suele establecer el tramo de interés con los colores amarillo pasando a marrón gradualmente y entre los valores 2 + a 3 + existe una evidente relación con la mayor producción de hidrocarburos (líquidos); este tramo se conoce como la "ventana del petróleo". Cabe señalar que hasta ahora no existe un patrón aceptado por todos los laboratorios, que tienen escalas basadas sobre experiencias individuales. En tal sentido muy recientemente Barss et al., 1979, han hecho una propuesta de unificación.

Esta técnica por sí sola no es absolutamente confiable pero unida a las otras adquiere una dimensión importante.

Aparte del color, también es importante observar el grado de preservación de los palinomorfos, pues con el aumento de temperatura muchos detalles delicados de la esculpturación se van deteriorando.

Estas mediciones deben hacerse con el debido cuidado, seleccionando bien el material, puesto que en la constelación de palinomorfos suelen presentarse muchas anomalías derivadas de fenómenos de reciclaje, contaminación, acción de paleoincendios, oxidación y degradación durante la fosilización, etc.

En la figura III se puede observar la relación de valores entre el TAI y otros índices. Estos valores son los que se utilizan en el laboratorio de Palinología donde trabajan los autores.

b) *Reflectancia de la vitrinita*: es quizá la técnica que actualmente ofrece mayor seguridad y objetividad en la determinación del grado de madurez. Como ya se mencionó, el método es muy utilizado en el análisis petrográfico de carbones y se ha convertido en un instrumento indispensable para determinar con precisión el rango de los mismos, extendiéndose en los últimos años al estudio de materia orgánica dispersa. (Hacquebard et al., 1970; Alpern et al., 1979). El valor medio de reflectancia de la vitrinita en aceite de inmersión ( $\overline{R}_o$ ), se obtiene luego de por lo menos cincuenta mediciones sobre distintas partículas de vitrinita de una misma muestra pulida. Los distintos estadios de evolución de una roca madre han sido correlacionados con los valores de  $R_o$  (ver fig. III):

$\overline{R}_o < 0,5$ a $0,7\%$ :	diagénesis	(materia orgánica inmadura)
$0,5$ a $0,7 < \overline{R}_o < 1,2\%$ :	catagénesis:	zona de generación de petróleo (materia orgánica madura).
$1,2 < \overline{R}_o < 2\%$ :	catagénesis:	zona de gas húmedo y condensados (transición de materia orgánica madura a senil).
$\overline{R}_o > 2\%$ :	metagénesis:	metano como único hidrocarburo (materia orgánica senil).

Los límites no son estrictos pues dependen del tipo de materia orgánica.

c) *Fluorescencia*: el estudio de la fluorescencia producida por la materia orgánica cuando es irradiada con luz azul o ultravioleta, posiblemente se transforme en los próximos años en un instrumento decisivo en la evalua-

ción de la madurez de rocas madres, pues es un método muy sensible justamente en la zona donde los valores de  $R_o$ , además de ser bajos, presentan poca variación. Se basa, por un lado, en la disminución de la intensidad de fluorescencia que se produce en la liptinita, desde las zonas inmaduras hasta desaparecer totalmente cuando la reflectancia de la vitrinita alcanza un valor aproximado de 1,3 %, y por otro en el desplazamiento de la longitud de onda de la luz fluorescente, desde el verde al rojo, que acompaña a esta disminución. La evaluación cuantitativa conjunta de estos dos fenómenos permite determinar el nivel de evolución de la materia orgánica. Un estudio detallado de esta técnica y su aplicación a la caracterización de rocas madres se puede encontrar en Robert, 1979.

d) *Otros métodos*: de los varios métodos químicos y fisicoquímicos basados en el análisis del querógeno, sólo se mencionarán dos:

1) Métodos de pirólisis: suministra información a partir de la caracterización cuantitativa de tres grupos de compuestos generados a partir del querógeno (Espitalié et al., 1977):

- i) hidrocarburos presentes en la roca, volatilizados a 200°-250° C;
- ii) hidrocarburos generados por pirólisis a altas temperaturas;
- iii) dióxido de carbono y agua.

2) Análisis elemental: mediante la relación de las razones atómicas H/C y O/C, y teniendo en cuenta el tipo de materia orgánica, se puede localizar al querógeno en un determinado estadio de su evolución.

Otro tipo de indicadores de madurez son los llamados indicadores químicos basados en el análisis del bitumen. Como la composición de los hidrocarburos, resinas y asfaltenos presentes en la roca madre depende de la naturaleza de la materia orgánica original y del grado de madurez térmica de la misma, se han desarrollado distintos métodos (fundamentalmente cromatográficos y de espectrometría de masas) conducentes a una determinación más o menos precisa del grado de evolución (Tissot et al., 1971; Barker, 1979). Estos se basan en un análisis cuali-cuantitativo de la fracción soluble total o alguna de sus subfracciones. Entre otros, los que han recibido mayor atención son: composición de hidrocarburos livianos, determinación de la predominancia de n-alcanos con número de carbonos impar frente a n-alcanos con número de carbonos par (CPI: "Carbon Preference Index") y variación del número de anillos en la fracción nafténica.

## CARBON

Se ha desarrollado hasta aquí una síntesis de las teorías más recientes relacionadas con los procesos que regulan la acumulación de materia orgánica dispersa en sedimentos, su transformación, las condiciones que rigen la generación de hidrocarburos, y se ha hecho una sucinta descripción de algunas de las técnicas más utilizadas por la geoquímica orgánica en la prospección petrolera.

Un tema íntimamente ligado al problema del petróleo, y que recobra vigencia a medida que las reservas de hidrocarburos disminuyen rápidamente en el mundo, es el estudio de otro combustible fósil: el carbón. Esta vinculación entre petróleo y carbón viene dada no sólo por características comunes

en el origen y evolución de ambos combustibles, sino también, como ya se ha visto, por la utilización de métodos de estudio en muchos casos similares; sin embargo, existen características diferenciales entre ambos, que se tratarán de exponer brevemente en este capítulo.

### **Tipos de carbones. Diagénesis**

Los carbones son fundamentalmente de dos tipos: carbones húmicos y carbones sapropélicos, y difieren tanto en su origen como en su composición.

Los *húmicos* se caracterizan por la alternancia de bandas brillantes y opacas, que reflejan la diferencia entre los componentes de los cuales se originaron; provienen principalmente de restos vegetales de plantas superiores ricos en celulosa y lignina; la formación de turba depositada en pantanos es el paso inicial en la constitución de un carbón húmico. Para ello deben satisfacerse una serie de requerimientos geológicos entre los que se cuentan: nivel evolutivo de la flora, clima (temperatura y humedad), condiciones tectónicas que permitan una subsidencia adecuada, y la existencia de una capa de agua poco oxigenada cubriendo los restos vegetales acumulados, que restringe la destrucción microbiana. (Stach et al., 1975).

La diagénesis de la turba involucra procesos químicos y microbianos, simultáneos con una gradual compactación del material. En la superficie de la turba y hasta una profundidad de aproximadamente 0,5 m ocurren transformaciones severas debidas a la acción de bacterias aerobias y hongos. A mayor profundidad, el número relativo de estos microorganismos decrece a medida que aumenta el número de bacterias anaerobias, que pasan a jugar el rol principal; todo signo de vida microbiana desaparece a una profundidad no mayor de 10 m, y sólo prevalecen transformaciones puramente químicas: polimerizaciones a partir de restos no utilizados por los microorganismos y policondensaciones.

Como consecuencia, el conjunto de estos procesos de degradación bioquímica y reorganización de estructuras moleculares, conduce esencialmente a la desaparición casi total de celulosa y en menor medida de lignina, a una concentración relativa de productos derivados de la misma y de lípidos, resinas y ceras vegetales (resistentes a la acción microbiana), y a la aparición de un nuevo tipo de compuestos característicos de la turbificación: las sustancias húmicas. Estos compuestos se definen empíricamente como la fracción de la turba soluble en un álcali (p. e.: solución acuosa de hidróxido de potasio) y se consideran formados por la repolimerización de los restos vegetales que han subsistido a la degradación bioquímica, y por policondensaciones posteriores.

La diagénesis de la turba produce cambios en sus características químicas y fisicoquímicas que, de un modo aproximado, indican el grado de evolución alcanzado; entre otros, un aumento importante del porcentaje de carbono y una disminución del porcentaje de humedad.

Los carbones *sapropélicos* no están tan ampliamente distribuidos como los húmicos; presentan un aspecto homogéneo sin la estratificación característica de los húmicos. Normalmente no son depositados como turba, sino como fango en aguas calmas y con deficiencia de oxígeno. Están compuestos

por restos de algas, plancton, esporas y material retrabajado proveniente de turbas. Químicamente, poseen un alto contenido en constituyentes ricos en hidrocarburos; desde el punto de vista microscópico, se los divide en "cannel", rico en esporas, y "boghead", caracterizado por la presencia de gran cantidad de restos de algas: las transiciones entre estos dos tipos de carbones sapropélicos son muchas.

Tanto por las condiciones de depositación y acumulación como por su composición, los carbones sapropélicos están relacionados con las lutitas bituminosas y las rocas madres de petróleo. Además, su evolución diagenética puede considerarse similar a la que sufre un sedimento organógeno.

### El proceso de carbonización\*

A medida que la turba es sepultada por sedimentos más jóvenes se produce un incremento en la temperatura y la presión; bajo estas condiciones la turba es comprimida y se producen transformaciones químicas y fisicoquímicas que dan origen, en largos períodos de tiempo, a carbones que se ordenan en series según el cambio progresivo de sus características: carbones pardos (lignitos), sub-bituminosos, bituminosos, antracita y metaantracita. La carbonización se define entonces como el proceso que, bajo la influencia de la temperatura, la presión y el tiempo, transforma en carbón los restos orgánicos de la turba que han subsistido a las transformaciones diagenéticas.

El rango del carbón (o sea su "madurez") puede determinarse con distintos parámetros (ver fig. III): un aumento de rango va acompañado por una disminución del porcentaje de humedad (relacionada con disminución de porosidad y pérdida de grupos hidrófilos superficiales), aumento del porcentaje de carbono y disminución de los de oxígeno e hidrógeno, disminución del porcentaje de materias volátiles, aumento de la reflectancia de la vitrinita y aumento del poder calorífico. Es importante aclarar que estos indicadores se utilizan selectivamente según el grado de evolución del carbón, es decir, justamente según el rango del mismo, pues las propiedades no varían uniformemente a lo largo de la serie. Así, porcentaje de humedad y poder calorífico se utilizan para determinación del rango en lignitos, carbones sub-bituminosos y bituminosos de alta volatilidad; reflectancia de la vitrinita, desde carbones sub-bituminosos hasta antracita; porcentaje de carbono, en carbones sub-bituminosos, bituminosos de alta volatilidad y antracitas; porcentaje de hidrógeno, en antracitas; porcentaje de materias volátiles, para bituminosos de volatilidad media y baja, y antracitas (Stach et al., 1975).

Debido al diferente comportamiento de los macerales en el proceso de carbonización, los estudios comparativos de rango se hacen normalmente sobre un concentrado de un solo maceral: la vitrinita (llamada huminita en los carbones de bajo rango), que, como ya se vio, está formada por restos leñosos y húmicos.

Los cambios químicos graduales producidos en la evolución del carbón a través de sus distintos estadios de rango, son similares a los ya analizados

\* Debido a la mayor distribución e importancia de los carbones húmicos frente a los sapropélicos, en lo sucesivo el desarrollo estará referido solamente a los primeros.

para el querógeno: al comienzo del proceso, las sustancias húmicas de los carbones ligníticos y sub-bituminosos pierden grupos hidrófilos superficiales ( $-\text{COOH}$  y  $-\text{OH}$ ) y el contenido en agua disminuye. Además, se eliminan otros grupos funcionales oxigenados (en general bajo la forma de dióxido de carbono y agua) de los núcleos aromáticos. Como consecuencia, el contenido en oxígeno disminuye, incrementándose la aromaticidad y el contenido en carbono. A medida que la carbonización avanza se pierden las cadenas carbonadas ricas en hidrógeno que unen los anillos aromáticos, aumentando simultáneamente las reacciones de policondensación. En la antracita las unidades aromáticas insinúan el ordenamiento característico del grafito. El análisis de diversos indicadores, demuestra un resultado previsible, como lo es la similitud entre el querógeno tipo III y los carbones húmicos; ambos se han originado a partir del mismo tipo de material y con procesos evolutivos semejantes.

### Relación entre carbón y petróleo

Los procesos formadores de carbón y de petróleo son esencialmente similares; ambos conducen, a través de profundas transformaciones de la materia orgánica original, por un lado, al surgimiento de un residuo carbonoso, con un alto grado de policondensación y aromaticidad: carbón o querógeno, y por otro a la aparición de una fracción móvil, rica en hidrógeno, con predominancia de compuestos hidrocarbonados: gas o petróleo.

¿Cuáles son las variables que condicionarán la acumulación de uno u otro combustible, carbón o petróleo? Ya se ha visto que factores determinantes son la calidad de la sustancia original y la forma de depositación y descomposición inicial de la misma. Los precursores del carbón son fundamentalmente materiales derivados de celulosa y lignina, que durante la turbificación son convertidos en sustancias húmicas. En cambio los precursores del petróleo se originan a partir de compuestos lipídicos de algas, bacterias y plancton, que, junto con proteínas e hidratos de carbono, sufren una transformación anaerobia intensa. Químicamente la diferencia más notable entre la fracción lipídica y las sustancias húmicas, es el alto contenido en compuestos alifáticos (ricos en hidrógeno) y baja aromaticidad de la primera.

El comportamiento de querógeno y carbón con el aumento de temperatura también es comparable. El querógeno genera petróleo y gas a partir de la ruptura de cadenas alifáticas y la liberación de cadenas hidrocarbonadas de alguna manera adsorbidas en la macromolécula; este petróleo migra y se acumula en reservorios. Esta generación a partir del querógeno se inicia bajo las mismas condiciones de temperatura, presión y tiempo en que los carbones alcanzan el rango de sub-bituminosos A ( $R_o = 0,5\%$ ) y finaliza cuando han alcanzado el estadio de bituminosos de volatilidad media ( $R_o = 1,2\%$ ).

Diversos estudios demostraron que los carbones también forman, a partir de restos lipídicos como cutículas y cubiertas de polen y esporas, compuestos de petróleo en el mismo rango de temperatura en que lo hace el querógeno; la composición de las sustancias hidrocarbonadas cambia claramente hacia una similitud con la composición del petróleo en el intervalo sub-bituminoso-

RANGO DEL CARBÓN (USA - ASTM)	C %	MV %	H <sub>2</sub> O %	R̄ <sub>o</sub> %	IAT	ZONAS de GENERACIÓN y DESTRUCCIÓN de HIDROCARBUROS
TURBA				0.2	1	METANO BIOGÉNICO TEMPRANO
LIGNITO	60	60	75	0.3		
			35			
SUB-BITUMINOSO	71	50	25	0.4	2	
C B A	77	40	8.10	0.5	2+	PETRÓLEO
				0.6		
				0.7		
BITUMINOSO DE VOLATILIDAD MEDIA	87	30		0.8	3	
				1.0		
BITUMINOSO DE VOLATILIDAD BAJA	20			1.2	3+	GASES HÚMEDOS Y CONDENSADOS
				1.4		
SEMI-ANTRACITA				1.6		METANO
ANTRACITA	91	10		1.8		
				2.0	4	
				2.0	4	
				3.0	5	TRAZAS DE METANO
				4.0		

REFERENCIAS	
C	CARBONO ( SECO Y LIBRE DE CENIZAS )
MV	MATERIA VOLÁTIL ( SECO Y LIBRE DE CENIZAS )
H <sub>2</sub> O	CONTENIDO DE HUMEDAD
R̄ <sub>o</sub>	REFLECTANCIA MEDIA DE LA VITRINITA EN ACEITE
IAT	ÍNDICE DE ALTERACIÓN TÉRMICA ( CIRGEO )

Fig. III.—Estadios de rango en carbones y algunos de los parámetros empleados en su determinación. Correlación con el Índice de Alteración Térmica en palinomorfos e hidrocarburos generados. Los límites de generación y destrucción no son estrictos pues dependen del tipo de materia orgánica y de la relación tiempo-temperatura. (Adaptado de Stach et al., 1973.)

bituminoso de alta volatilidad. La petrografía posteriormente confirmó, utilizando microscopía de fluorescencia, la formación de estos compuestos similares a los del petróleo: se identificaron exsudados fluorescentes provenientes de liptinita y, en algunos carbones de bajo rango, de vitrinita (Stach et al., 1975).

Por encima de bituminosos de mediana volatilidad, algunas de las sustancias formadas son descompuestas en hidrocarburos de menor peso molecular, y otras son transformadas en compuestos policondensados incorporados al carbón.

Una pregunta interesante es si el carbón puede funcionar como roca madre de petróleo. Hasta el momento, aunque se sabe que el carbón es capaz de generar cierta cantidad de hidrocarburos, no se ha encontrado ningún yacimiento de petróleo comercialmente explotable, asociado a uno de carbón, en cambio sí acumulaciones de gas económicamente valiosas.

#### BIBLIOGRAFIA

- Alpern B. y Bostick N., 1979. Pétrographie de la Matière Organique Dispersée des Sédiments. Bilan d'activité de la Commission Internationale, 8ième Congr. Int. Strat. Géol. Carb., Moscú, 1975, C. R. v. 4: *Petrography and genesis of coal*, Moscow, Nauka, p. 17-23.
- Barker, C., 1979. *Organic Geochemistry in Petroleum Exploration*. Am. Assoc. Petr. Geol. Continuing Education Course Note Series nº 10.
- Barss, M. S., Bujak, J. P. y Williams G. L., 1979. Visual Kerogen Analysis: The Time for Standardization? *Abstr. Proc. Tenth Ann. Meeting, A.A.S.P. Palynology 3*: 278.
- Bostick, N., 1971. Thermal Alteration of Clastic Organic Particles as an Indicator of Contact and Burial Metamorphism in Sedimentary Rocks, *Geosc. and Man 3*: 83-92.
- Bujak, J. P., Barss, M. S. y Williams, G. L., 1977. Offshore East Canada's Organic Type and Color and Hydrocarbon Potential. *The Oil and Gas Journ.* Apr. 4, p. 192-202.
- Combaz, A., 1964. Les palynofacies. *Rev. Micropal. 7* (3): 205-218.
- Dow, W. G., 1977. Kerogen Studies and Geological Interpretations. *Journ. Geochem. Explor. 7*: 79-99.
- Durand, B. y Espitalié, J., 1973. Evolution de la matière organique au cours de l'enfouissement des sédiments. *C. R. Acad. Sc. Paris*, 276. Série D: 2253-2256.
- Espitalié, J., Laporte, J. L.; Madec, M.; Marquis, F.; Leplat, P.; Paulet, J. y Bouteven, A., 1977. Méthode Rapide de Caractérisation des Roches Mères, de leur Potentiel Pétrolier et de leur Degré d'Evolution. *Revue de l'Inst. Fr. Pétr.* XXXII (1): 23-42.
- Forsman, J. P. y Hunt, J. M. 1958. Insoluble Organic Matter (Kerogen) in Sedimentary Rocks. *Geochim. et Cosmochim. Acta 15*: 170-182.
- Gijzel, P. van, 1971. Review of the UV-Fluorescence Microphotometry of Fresh and Fossil Exines and Exosporia, en: Brooks et al.: *Sporopollenin*, London, New York (Academic Press), p. 659-685.
- Hacquebard, P. A., y Donaldson, J. R., 1970. Coal Metamorphism and Hydrocarbon Potential in the Upper Paleozoic of the Atlantic Provinces, Canada. *Canadian Journ. Earth Sc.* 7: 1140-1163.
- Marchand, A.; Libert, P. A. y Combaz, A., 1968. Sur Quelques Critères Physicochimiques de la Diagenèse d'un Kérogène. *C. R. Acad. Sc. Paris*. 266. Série D: 2316-2319.
- Ottenjann, K., Teichmüller, M. y Wolf, M., 1975. Spectral Fluorescence Measurements of Sporinites in Reflected Light and Their Applicability for Coalification Studies, en: Pétrographie de la Matière Organique des Sédiments. Relations avec la Paléotemperature et le Potentiel Pétrolier. *C.N.R.S.*, Paris, 15-17 septembre 1973, p. 49-65.

- Robert, P., 1979. Classification des Matières Organiques en Fluorescence. Application aux Roches-Mères Pétrolières. *Bull. Centre Rech. Explor. Prod. ELF-Aquitaine*. 3 (1) : 223-263.
- Stach, E.; Mackowsky, M. Th.; Teichmüller M.; Taylor, G. H.; Chandra, D. y Teichmüller, R., 1975. *Stach's Textbook of Coal Petrology*. 2nd. ed., Gebrüder Borntraeger Berlin-Stuttgart.
- Staplin, F. L., 1969. Sedimentary Organic Matter, Organic Metamorphism and Oil Gas Occurrence. *Bull. Canad. Petr. Geol.*, 17 (1) : 47-66.
- Tissot, B.; Califet-Debyser, Y.; Deroo, G. I. y Oudin, J. L., 1971. Origin and Evolution of Hydrocarbons in Early Toarcian Shales, Paris Basin, France. *Am. Assoc. Petr. Geol. Bull.* 65 (12) : 2177-2193.
- Tissot, B. P., Espitalié, J., 1975. L'évolution Thermique de la Matière Organique des Sédiments. Applications d'une Simulation Mathématiques. *Revue de l'Inst. Fr. Pétr.* XXX (5) : 743-777.
- Tissot, B. P. y Welte, D. H., 1978. *Petroleum Formation and Occurrence. A New Approach to Oil and Gas Exploration*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.

## NOTICIAS

### II REUNION DE PALEOBOTANICOS Y PALINOLOGOS BRASIL, SÃO PAULO, DICIEMBRE 6-8 de 1979

La II Reunión fue auspiciada por el Departamento de Paleontología y Estratigrafía de la Universidad de São Paulo, la Academia de Ciencias del Estado de São Paulo y la Asociación Latinoamericana de Paleobotánica y Palinología, cuyo presidente, Dr. Oscar Rösler, actuó como Coordinador General.

Se presentaron 26 trabajos que cubrieron todo el amplio espectro de estas disciplinas. Si bien dominaron las presentaciones de los colegas de Brasil, cabe destacar la presentación de materiales correspondientes a otros países latinoamericanos, como Argentina, Colombia y Chile. Este hecho le ha conferido un marco más amplio al certamen en el que confraternizaron los científicos sudamericanos.

Los títulos más numerosos correspondieron a temas sobre la Paleobotánica y Palinología del Neopaleozoico y Actuopalínología. Podemos señalar que el nivel general de las presentaciones fue muy bueno: junto con los trabajos sistemáticos o estratigráficos de tipo tradicional, tuvimos la oportunidad de asistir a presentaciones con detalles de sedimentología paleoambiental, paleoecología, estudios con microscopía electrónica o en infrarrojo.

Esta reunión ha servido también de marco a otras vinculadas. Se efectuó una Asamblea General de la Asociación Latinoamericana de Paleobotánica y Palinología, una reunión de Angiospermólogos (colaboración ALPP/IAAP) y la reunión del Grupo de Trabajo sobre depósitos continentales gondwánicos de América del Sur de la Subcomisión Internacional de la Estratigrafía del Carbonífero (SCCS-IUGS).

Las comodidades brindadas por las modernas instalaciones del Departamento de Estratigrafía y Paleontología del Instituto de Geociencias en la

Ciudad Universitaria posibilitaron una cómoda y agradable estancia durante las largas sesiones. Una cena de camaradería y un ágape de despedida, ofrecido por la Asociación Latinoamericana de Paleobotánica y Palinología, pusieron un simpático broche a esta Segunda Reunión que, es de esperar, se repetirá nuevamente. La misma ha sido un nuevo jalón en el camino que paleobotánicos y palinólogos latinoamericanos han trazado. Es un nuevo aporte, sustancial por cierto, a la movilización de grupos de trabajo e investigadores individuales que canalizaron sus trabajos e ideas en el marco más apropiado, formado exclusivamente por colegas con las mismas inquietudes. No quiero pecar de exagerado al afirmar que estas reducidas asambleas —en comparación con los ya hiperdimensionados congresos internacionales— son en realidad las verdaderas reuniones de trabajo fecundo, donde los investigadores hablan y discuten en el mismo lenguaje científico. En ellas, todos conversan con todos, durante las sesiones o aparte de las mismas. Felizmente, tal filosofía ha echado raíces ya en varios puntos de nuestra América Latina: en México, Argentina y Brasil. Podemos suponer, entonces, que estamos superando la primera —quizás más ardua— etapa de afianzamiento. Ahora debemos pasar a la etapa siguiente, del desarrollo, en la que reuniones como la realizada en São Paulo, sean periódicas y se vinculen a una temática de interés regional.

*Sergio Archangelsky*



## TERMOPALINOLOGIA: CONFIABILIDAD DEL METODO "LUZ TRANSMITIDA"

### Primera parte

por ARMANDO SALAS<sup>1</sup> y JORGE SEILER<sup>1</sup>

**ABSTRACT:** In this study the thermal alteration index using transmitted light, obtained by two independent observers covering 26630 meters of sediments, is compared. Fifty percent of the samples contain only a limited number of thermofossils; ninety five percent of the material is represented by cuttings. In spite of those circumstances a high level of coincidences was obtained.

### I. INTRODUCCION

#### I. 1. Antecedentes

Durante su historia geológica, los sedimentos de la corteza terrestre han estado expuestos a diferentes fuentes térmicas por tiempos variables, tales como el gradiente geotérmico normal, el magmatismo efusivo e intrusivo, etc.

La materia orgánica contenida en las sedimentitas actuó como un termómetro que registró dichas paleotemperaturas y que permite leerlas actualmente en forma sencilla; frecuentemente sirve como elemento de juicio que permite identificar la fuente térmica originaria. El rango aproximado de paleotemperaturas que se puede estimar con luz transmitida es de hasta 250° C.

Ocurre que, frente a temperaturas crecientes, la materia orgánica experimenta sucesivas transformaciones físicas y fisicoquímicas, susceptibles de ser medidas o estimadas. A cada estado de transformación corresponde un equivalente de paleotemperatura. Así por ejemplo, ciertos tipos de materia orgánica —los Termofósiles— cambian sus colores en forma gradacional, desde el incoloro amarillento (aproximadamente hasta 65° C), pasando por el marrón hasta llegar al negro (próximos a los 200° C). Luego si la temperatura continúa aumentando, la materia orgánica comienza a volatilizarse.

Si se extrae de alguna forma (por ejemplo, con un procesamiento palinológico), la materia orgánica contenida en una roca sedimentaria y se inves-

<sup>1</sup> Yacimientos Petrolíferos Fiscales (Y.P.F.), Geia. Planificación Geológica, Area Laboratorio Geológico.

tigar sus colores, se podrá deducir con bastante aproximación las paleotemperaturas que soportaron los sedimentos portadores.

Un estudio sistemático en una cuenca, mediante datos de subsuelo preferentemente, y afloramientos, dará rápidamente una idea de como ha sido la evolución térmica regional.

Sumando a este dato clave otros, tales como la cantidad de materia orgánica y los diferentes tipos de la misma, más la palinología taxonómica, se puede configurar el cuadro ambiental, su marco geotectónico, evaluar cualitativamente la capacidad de la roca para generar hidrocarburos, etc.

En el caso particular de las rocas madre del petróleo, ocurre que ambos procesos, transformaciones colorimétricas y generación de hidrocarburos, están frecuentemente asociados. Por lo tanto, observando o midiendo los colores sabremos cuando una sedimentita tuvo el rango de temperaturas aptas para ser roca generadora: aproximadamente desde los 60° C (colores amarillento-marrones) hasta 150° C (marrón ennegrecido). Otros factores que condicionan la generación son el tiempo durante el cual actuó la temperatura, la cantidad de materia orgánica (un mínimo del 0,5 % del peso de la muestra) y los tipos de la misma, en orden decreciente de capacidad productora: Amorfógeno, Firógeno, Hilógeno y Melanógeno.

Existen diversas técnicas para evaluar las transformaciones físicas y fisicoquímicas. Una de ellas consiste en la observación de los colores de los termofósiles en un microscopio óptico, habitualmente con 200-400 aumentos, sobre preparados palinológicos obtenidos con algunos recaudos. Se conoce como Método de Luz Transmitida.

Staplin (1969), propone la aplicación de este método, mediante la utilización de cinco números, del 1 al 5, que caracterizan a otros tantos estadios térmicos crecientes. A los números se los denomina Indices de Alteración Térmica, o bien, para abreviar, I.A.T. o Indices. Cada uno corresponde a un cierto color, un cierto intervalo de temperaturas, una cierta capacidad potencial de generar determinados hidrocarburos (ver gráfico I).

La evaluación de un color con luz transmitida depende del observador; es decir, es subjetiva. Un error en la apreciación se transmitirá inevitablemente a cualquier otro parámetro, que en forma directa o indirecta se deduzca de la interpretación del color, por ejemplo: porcentaje tentativo de carbono fijo, paleotemperaturas, capacidad generadora de la roca.

La subjetividad en las evaluaciones, es el punto más débil de una técnica que, en otros aspectos tiene tantas ventajas que, según Burgess (1977), resulta uno de los métodos subjetivos para medir Indices, de mayor difusión mundial.

Entre los métodos objetivos de amplia aceptación, el autor recién citado menciona el de Reflectancia de Vitrinita, en el cual las mediciones se efectúan fotométricamente, y por lo tanto son más exactas.

Más antecedentes se hallan en Bujak *et al* (1977), Correia (1967), Soller y Salas (1980), Staplin (1969), Tissot y Welte (1978), Wilson (1971).

		PALEOTEMPERATURAS EN °C s/DEMAISON — 1973								
I. A. T. Y COLOR TERMO- FOSILES	REFLECTANCIA DE VITRINITA	FRANCIA	ALEMANIA	RUSIA	U. S. A.	CANADA	AUSTRALIA	DIFERENCIAS MAXIMAS	TEMPERATURA PROMEDIO	HIDROCARBUROS ASOCIADOS
		CORREIA 1969	TEICHMÜLLER 1970	KARTSEV VASOEVICH ET AL 1971	BOSTICK 1971	STAPLIN ET AL 1973	DEMAISON 1973			
AMARILLO 2		60°		60°	55°	60°	60°	5°	60°	Gas biogé- ticamente derivado.
AMARILLO MARRON								25°	105°	Hidrocarburos Líquidos.
3 ± 0.6		90°	115°	115°	90°		115°			
MARRON								50°	150°	Gas Húmedo.
3.5 ± 0.9										
MARRON ENNEGRECIDO A										
NEGRO 4								10°	205°	Gas térmica- mente derivado.
OPACO										

GRAFICO I: PARAMETROS TERMOPALINOLÓGICOS E HIDROCARBUROS ASOCIADOS

## 1. 2. Nomenclatura

Hasta el momento, no existe uniformidad de criterios para designar a la disciplina que se ocupa del estudio de la materia orgánica. Salas (1980-b) propone el nombre Termopalinología para designar a esta especialidad; Palinología lo mantiene para la palinología taxonómica tradicional y Termofósiles para "partículas fósiles que sirven para evaluar I.A.T.; son aquellos fósiles que experimentan frente a temperaturas crecientes algún tipo de cambio susceptible de ser medido o evaluado, y se convierten en termómetros que permiten apreciar rangos de temperaturas en forma gradada". Esta definición incluye por un lado, a termofósiles no palinomórficos, p. ej. los conodontes, según Epstein *et al* (1975, en Burgess, *op. cit.*) y, por el otro, circunscribe el término para su aplicación a escasos integrantes de la materia orgánica.

Ello se debe a que si bien, todo lo orgánico fósil actúa como termómetro, hay escasos componentes que reflejan los cambios de temperatura en forma gradada, a saber: polen, esporas y cutículas, Correia (1967); Staplin (1969). Los quitinozoos y los acritarcos, son termómetros menos confiables; no reaccionan ante el calor en forma gradacional, sino discontinua.

La palabra Termopalinología es explícita en sí misma, alude a la incidencia del calor (energía), como fuente última y fundamental en el proceso de generación de hidrocarburos, la conjunción de nombres Palinología/Termopalinología evoca a otra prestigiosa cupla usada y aceptada en las ciencias físicas: Dinámica/Termodinámica. Salas (*op. cit.*).

## I. 3. Objetivos

En este trabajo se comparan las evaluaciones obtenidas en perfiles de pozo, por dos observadores independientes especializados en termopalinología, que han determinado Indices de Alteración Térmica por luz transmitida con los métodos y en las condiciones que se describen más adelante.

Asimismo se comparan, en otros pozos, las evaluaciones obtenidas por tres observadores independientes.

Finalmente se revisa en un pozo, el resultado obtenido por este método con otro método objetivo, el de reflectancia de vitrinita, y se efectúan algunas comparaciones entre ambos.

## II. EQUIVALENTE TERMICO DE LOS INDICES DE STAPLIN. EQUIVALENCIA DE LAS MEDICIONES CON LUZ TRANSMITIDA Y VITRINITA

Los equivalentes térmicos de Indices adoptados en el presente trabajo (ver gráfico I, temperaturas promedio en °C), se obtuvieron promediando los valores que distintos autores, trabajando en distintas partes del mundo, han dado para los mismos. Dichos valores de paleotemperaturas para cada índice fueron tomados de Demaison (1973:223) y son las que se muestran en gráfico I.



Como se podrá apreciar, la versión de diferentes autores para los índices 2, 3 y 4 son aproximadamente coincidentes; en cambio en el caso del índice 3,5 la divergencia entre el valor mínimo, 120° C (Bostick 1971) y el máximo, 170° C (Staplin *et al.* 1973) es de 50° C.

El pozo del gráfico III, columna 2, fue estudiado hasta los 1650 m por Allen (1979). El estudio termopalinológico del pozo (vitritina y luz transmitida) diagnostica que los valores de reflectancia de vitritina, solamente se pudieron obtener en dos niveles, debido al mal estado de conservación que exhibían las partículas a lo largo del perfil. Respecto de las posibilidades como roca madre, diagnostica que el pozo está maduro para la generación de hidrocarburos líquidos, y que se aproxima la zona de generación de gases en el fondo del pozo.

La segunda de las conclusiones, concuerda con las observaciones obtenidas independientemente por los autores (luz transmitida) hasta el nivel 1.650 m. La relación de valores de los índices medidos con microscopio de reflectancia y los evaluados con luz transmitida que se da en gráfico I se tomó de Quadros (1975:9).

En el informe de Allen (*op. cit.*) los valores de vitritina para los niveles 640 y 1260m son (aproximadamente, se dedujeron de los gráficos del informe) respectivamente 0.6 y 0.9.

### III. METODO DE TRABAJO

#### III. 1. Introducción

Se utilizó el método de luz transmitida en la forma que sugiere Staplin (1969), subdividiendo los Índices en valores en más y en menos (por ej. — 3 y + 3) tal como se muestra en el gráfico III; cada subdivisión corresponde a matices de los colores que Staplin asigna a cada Índice.

Los pozos que se utilizaron para realizar este trabajo, enumerados en gráfico II, son cronológicamente los últimos que se han estudiado (palinología y termopalinología) en Y.P.F.

El diseño "índices vs. profundidades" del gráfico III, fue elaborado siguiendo las normas de los trabajos a los que se refiere el párrafo anterior.

En algunos casos (gráfico III, 3ª columna) se realizó una comparación triple, para lo cual se utilizaron informes del Centro de Investigaciones en Recursos Geológicos (C.I.R.G.E.O.), Archangelsky y Gamero (1980). Para poder efectuar la comparación, los datos del C.I.R.G.E.O. se volcaron en los gráficos utilizados en el Laboratorio Geológico.

Las evaluaciones realizadas por los autores fueron efectuadas en todos los casos sobre los mismos preparados palinológicos.

Cada autor trabajó independientemente, ignorando los resultados obtenidos por el otro.

Se evaluaron otras posibles fuentes de error (ópticas, palinológicas, etc.), y se tomaron las medidas adecuadas para eliminarlas o reducirlas a un mínimo; según Salas (1979-a), ellas son:

### III. 2. Posibles fuentes ópticas de error

Las precauciones más importantes en este punto fueron las destinadas a asegurar condiciones de observación e iluminación lo más uniformes posibles para todas las lecturas, por ello:

—Todas las evaluaciones realizadas por los autores se efectuaron en un solo microscopio (Leitz Orthoplan Nº 956.641 del Laboratorio Geológico).

—Todas las observaciones se efectuaron con luz blanca, transmitida.

—Dado que la evaluación de un color depende parcialmente de la intensidad de luz (temperatura de color) con que se trabaja, se mantuvo a ésta, en forma manual, en un valor constante: 6 voltios del transformador, para lámpara de halógeno 12V/100W.

Los diafragmas del microscopio se mantuvieron con apertura constante para todas las mediciones: el diafragma de iluminación en el valor 4 y el de campo totalmente abierto.

—El casquete (lente frontal), del condensador estuvo interpuesto en todas las mediciones y levantado hasta el tope.

### III. 3. Posibles fuentes palinológicas de error

Hasta cierto grado de alteración térmica (aproximadamente Índice 3), la materia orgánica posee colores heterogéneos —incluso en un mismo esporomorfo— debido a diferentes causas posibles:

- a) distintos espesores de exinas o paredes (y por lo tanto distinta respuesta a la transmisión de la luz);
- b) distintas ornamentaciones;
- c) Contaminación (ya sea la producida en laboratorio, ya sea por contaminación de material caído en el caso de muestras de cuttings).
- d) redeposición, etc.

Cuando los Índices son mayores que 3, los colores de todos los tipos de materia orgánica tienden a ser más homogéneamente oscuros, el factor heterogeneidad como causal de error se atenúa, las causales posibles, c) y d), persisten.

El palinólogo que recorre un preparado a los efectos de evaluar I.A.T., reconoce y diferencia los materiales afectados por los motivos antes citados, busca y retiene mentalmente los termofósiles apropiados (lo cual implica el dominio de la palinología de los distintos períodos) y cuando ha observado la cantidad de material que considera suficiente, hace una evaluación del Índice.

Si el material presente resulta escaso como para formarse una idea, la evaluación puede llegar a contener errores considerables. En este último caso, dos observaciones independientes de un mismo preparado tienen bastantes posibilidades de disentir considerablemente.

En el presente trabajo, en el que los autores estiman un 50 % de muestras (o metros), con escasos termofósiles, se acordó trabajar en todas las eras fanerozoicas, preferentemente con algunas formas: cutículas de hojas, esporas levigadas, esporas zonales y granos de polen sacados.

### III. 4. Posibles fuentes de error derivadas de una incorrecta asignación de equivalente térmico para el valor 3.5 de Staplin

Según el análisis efectuado más arriba, en el ítem "Equivalente térmico...", el error que se cometería al asimilar índices a paleotemperaturas, podría ser significativo para aquellos valores comprendidos entre los índices 3 y 4 de Staplin, debido a que el equivalente térmico del índice 3.5 se fijó en el valor 150° C. Concretamente, las evaluaciones de los autores podrían contener errores en el caso de que dicho equivalente fuese otro. Habría errores por defecto en el rango de índices 3 al 3.5 y por exceso entre 3.5 y 4 (o a la recíproca).

En esta situación se hallan aproximadamente 4.000 de los 26.630 metros comparados (15 % de las mediciones) que afectan principalmente a los pozos de la Cuenca Noroeste.

De los 4.000 metros señalados, 3.000 tienen diferencias leves, los 1.000 restantes ofrecen diferencias significativas.

Aproximadamente la mitad de los valores divergentes se hallan entre 3 y 3.5 y la otra mitad entre 3.5 y 4; por lo tanto los posibles errores por defecto de los primeros 4.000 metros se compensarían en gran parte con los consecuentes errores por exceso (o a la recíproca) de los 4.000 restantes. Esto se aprecia claramente en el pozo del gráfico III, 2ª columna.

### III. 5. Posibles fuentes de error derivadas del cansancio físico del observador

El cansancio físico se refleja en evaluaciones a veces notablemente diferentes de aquellas que se logran cuando se está descansado. Por ello los índices se obtuvieron preferentemente en horas de la mañana.

### III. 6. Posibles fuentes de error derivadas de las mediciones sobre gráficos

En los informes termopalínológicos, el dato "índice vs. profundidades", habitualmente se presenta graficado porque así resulta más clara y cómoda su lectura.

Los gráficos utilizados en Y.P.F., diseñados por Salas y Seiler (1979), semejantes a los que se exhiben en gráfico III, difieren de los utilizados por el C.I.R.G.E.O. Por lo tanto, a los efectos de poder comparar correctamente las evaluaciones de tres autores, fue preciso trasladar las evaluaciones de dicho Ente a los gráficos de Y.P.F.

En esta operación, de trasladar los datos de un sistema de representación a otro, los autores estiman posibles errores de  $\pm 5^\circ \text{C}$  hasta el índice 3 y de  $\pm 10^\circ \text{C}$  entre los índices 3 y 4 para las mediciones del C.I.R.G.E.O.

En general, los errores que se pueden haber deslizado en las mediciones sobre gráficos (efectuados con regla milimetrada) o bien en los traslados de un sistema de representación a otro, quedan compensados por la imprecisión de las estimaciones (aproximadamente  $\pm 10^\circ \text{C}$ ).

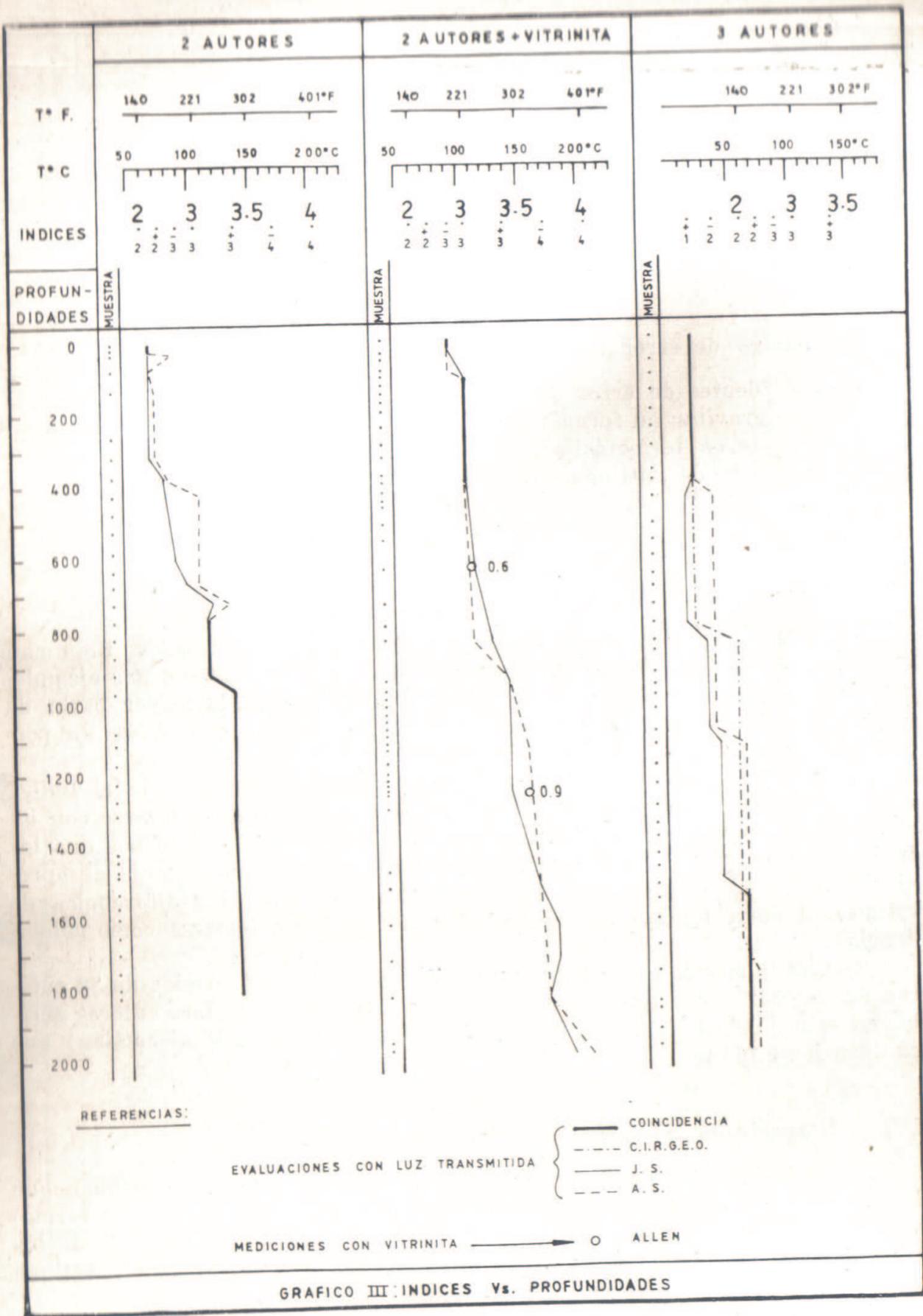


Fig. 5

### III. 7. Posibles fuentes de error derivadas de la naturaleza de la muestra

En el presente trabajo, el 95 % de las muestras analizadas son de cuttings. El material caído por sí sólo no es una fuente de error importante, siempre que las muestras sean ricas en termofósiles; ya que en este último caso se puede discriminar el material contaminado por cuttings del autóctono y evaluar el I.A.T. correctamente. En las muestras de cuttings con escasa materia orgánica, el Índice puede resultar difícil de precisar.

### III. 8. Fuentes de error sumadas

De las fuentes de error que se han analizado, los autores estiman que hay dos que gravitan en forma muy negativa cuando se dan simultáneamente:

- a) pobreza en termofósiles;
- b) muestras de cuttings.

## IV. CONCLUSIONES

### IV. 1. Generalidades

En el gráfico IV se dan resultados tabulados y graficados. En dicho gráfico, cuando una diferencia de paleotemperatura se expresa, por ejemplo, como 850 metros de "hasta  $\pm 3^\circ \text{C}$ ", ello significa que la mayor parte de los 850 m, tienen diferencias aproximadas a los  $3^\circ \text{C}$  y que existe un porcentaje bajo, de valores menores que  $3^\circ \text{C}$ .

Los autores estiman en base a su experiencia personal, que el Índice (luz transmitida) estimado por cualquiera de ellos, debe considerarse con un rango de imprecisión aproximadamente de  $\pm 10^\circ \text{C}$ . Esto significa que los Índices del gráfico III deben considerarse como ejes de una franja de aproximadamente  $20^\circ \text{C}$  de ancho. Dicho en otras palabras, las diferencias de estimación entre los autores hasta los  $\pm 10^\circ \text{C}$  deben tomarse como coincidencias.

Resulta llamativo el contraste que existe entre las diferencias de "2 autores en 26.630" y "2 autores en 6.165" (ver gráfico IV). Los autores atribuyen esto a la particular pobreza en termofósiles (sumada al cutting) que exhiben los 6.165 m.

### IV. 2. Respecto de las fuentes de error consideradas

Entre las fuentes de error que se consideraron, los autores estiman que la que ha tenido real peso en las evaluaciones ha sido la escasez de termofósiles, que tal como se señaló, afectó aproximadamente a un 50 % de los metros estudiados, sumada al tipo de muestra predominante, el cutting (95 %), que induce a confusión con su material caído.

En un pozo con escasos termofósiles ocurre que las mediciones de dos autores independientes, frecuentemente disienten desde el principio, y a

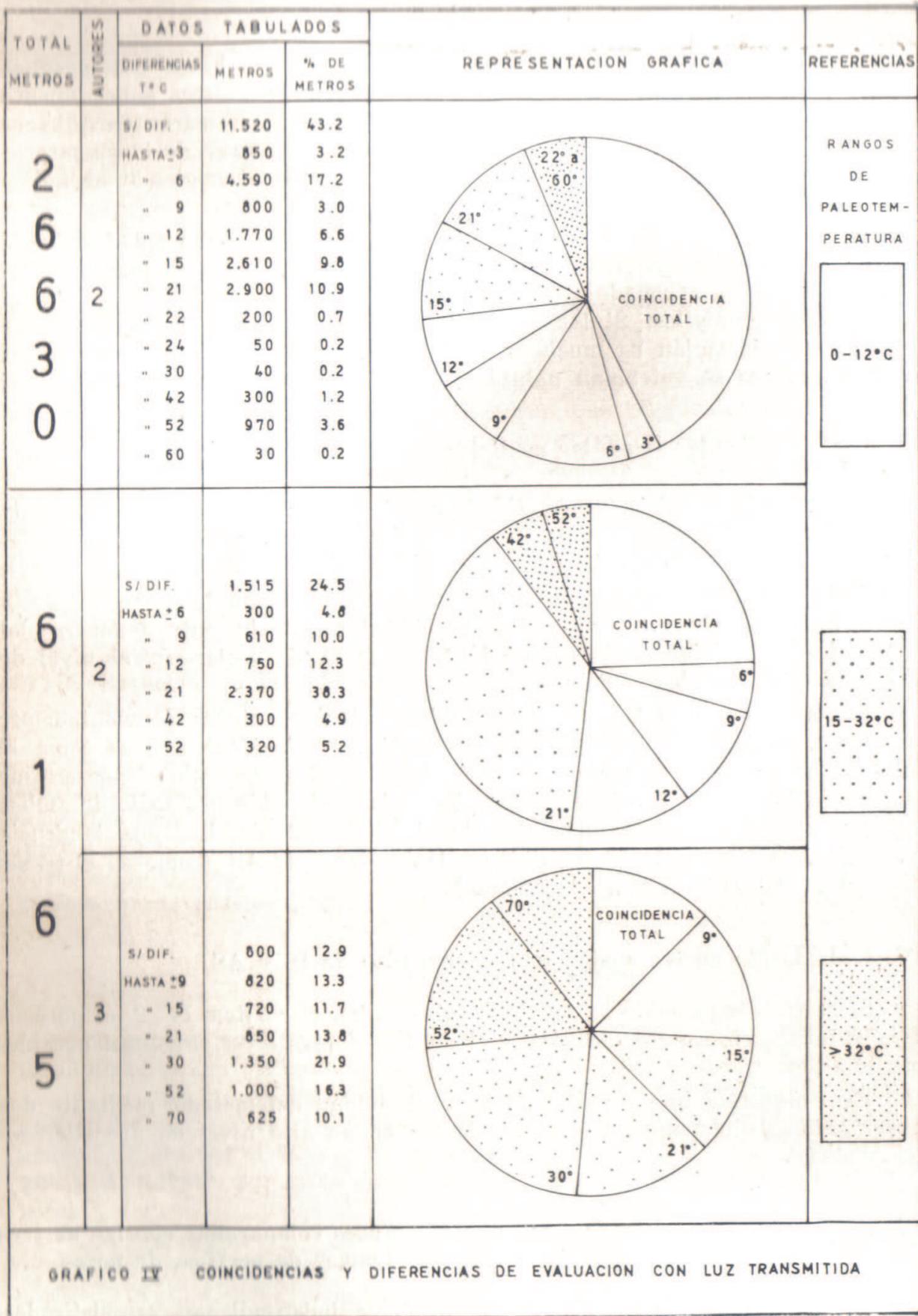


GRAFICO IV COINCIDENCIAS Y DIFERENCIAS DE EVALUACION CON LUZ TRANSMITIDA

Fig. 6

veces considerablemente, en particular si son cuttings, hasta que después de haber analizado varios niveles sucesivos, se llega a índices generalmente convergentes o coincidentes. La cantidad de material necesario para hacer la evaluación que no se halló en la primera muestra, surge de la sumatoria de muestras sucesivamente observadas, y permite ir corrigiendo el índice sobre la marcha.

Es por ello que, el índice medido en un pozo es mucho más confiable que el de cualquiera de las muestras de ese mismo pozo, evaluadas aisladamente. Lo recién afirmado se puede generalizar a cualquier pozo, rico o escaso en termofósiles. Si las muestras son de cuttings y los termofósiles escasos, la afirmación es mucho más valedera aún, ya que ambas fuentes de error unidas se potencian notablemente.

#### **IV. 3. Generalidades sobre las mediciones**

En un gráfico I.A.T./profundidad, no siempre el índice aumenta con la profundidad creciente. En ocasiones, experimenta descensos poco significativos por tramos cortos o largos (ver gráfico III, 3ª columna, traza de JS).

Dado que esta observación solamente se efectuó con luz transmitida, y los descensos evaluados no superan los 10° C (es decir, entran dentro del rango de imprecisión de la evaluación), no se puede esclarecer el nivel de objetividad de la observación.

Las gráficas de I.A.T vs. profundidades de los autores frecuentemente se entrecruzan. Si se desprecian las evaluaciones coincidentes, y se toma al total de las divergentes como un 100 %, hay un 65 % de evaluaciones en que las desviaciones a la izquierda o derecha de la evaluación promedio de ambos autores, se compensan mutuamente. En el 35 % restante, hay una tendencia a que las mediciones de JS. se sitúen a la izquierda de AS (como en el tramo divergente del gráfico III, 1ª columna).

#### **IV. 4. Respecto de las mediciones comparadas de JS y AS**

Si se tiene en cuenta lo señalado más arriba, en el ítem IV. 2, el porcentaje de evaluaciones coincidentes y el de diferencias leves, resultan notablemente altos.

Esto significa que a pesar de la subjetividad del método, mediante dos observaciones independientes se puede lograr un alto nivel de precisión en las evaluaciones.

#### **IV. 5. Respecto de las mediciones de dos autores comparadas con las de tres autores que han medido los mismos tramos de perfiles de pozos**

El aumento en el número de observadores independientes especializados, trae aparejado un aumento en las divergencias de estimación. Esto se observa claramente en el gráfico IV (6.165 m por 2 y por 3 autores).

Cuando el dato final que se busca dilucidar es de aplicación practica y se requiere con cierta urgencia —tal como la capacidad generadora de un pozo en una empresa petrolera—, los autores consideran que dos observaciones independientes del I.A.T son suficientes para detectar eventuales errores de estimación.

#### IV. 6. Respecto de la comparación de las evaluaciones con luz transmitida y las mediciones con reflectancia de vitrinita

En el perfil del gráfico III, 2ª columna, con reflectancia de vitrinita solamente se pudieron obtener dos valores (ver ítem "Equivalente térmico..."). Con luz transmitida, los autores pudieron investigar cómodamente el índice a lo largo de todo el perfil, con una diferencia de interpretación francamente insignificante.

Esto significa, que si bien el método de vitrinita posee una exactitud de la que adolece el de luz transmitida, mediante este último se pueden investigar extensas áreas vedadas al otro método. Ambos métodos deben usarse en forma complementaria.

#### IV. 7. Respecto de la influencia sobre las interpretaciones de generación de hidrocarburos

Las diferencias de hasta 21° C entre los autores significan, en la evaluación de la capacidad generadora de los distintos pozos estudiados, diferencias poco significativas que raramente superan los 100 metros para establecer los límites entre distintas zonas: zona de comienzo de generación de hidrocarburos líquidos, zona de destrucción de hidrocarburos líquidos y generación de hidrocarburos gaseosos, etc.

### V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las autoridades de Y.P.F., la autorización para la publicación del presente trabajo.

A los doctores Wolfgang Volkheimer Gualter Chebli y Juan R. Robbiano por la lectura crítica del manuscrito y la sugerencia de valiosas ideas; al señor G. Sisto por el esmero en los dibujos, y a los señores S. Pérez, R. Echagüe y B. Lobato, por el cuidado con que realizaron los preparados palinológicos.

### BIBLIOGRAFIA

- Allen, M. L., 1979. Palynology and Source Rocks potential of four wells in Argentina, Phillips Petroleum Company. Exploration Projects Section. (*Informe inédito*).
- Archangelsky, S. y Gamero, J. C., 1980. Informe final del estudio palinológico de los pozos YPF, CCMI, Ra x-1 y Pu.x-1 (Ranquel y Puelche). C.I.R.G.E.O., págs. 1-18, (*informe inédito*).

- Bostick, N. H., 1971. Thermal alteration of clastic organic particles as an indicator of contact and burial metamorphism in sedimentary rocks. *Geoscience and Man*, vol. III. October 1.
- Bujak, J. P.; M. S. y Williams, G. L., 1977. Offshore East Canada's organic type and Gas Journal, april 4, 1977, págs. 198-202.
- Burgess, J. D., 1977. Historical review and methods of determining thermal alteration of organic material. *Palynology*. vol. I, págs. 1-7.
- Correia, M., 1967. Relations possible entre l'état de conservation des éléments figurés de la matière organique (microfossiles palyno-planctologiques) et l'existence de gisements d'hydrocarbures. *Revue de l'IFP*, Paris, vol. 23, págs. 1285-1300.
- Correia, M., 1969. Contribution a la recherche des zones favorables a la genese du pétrole par l'observation microscopique de la matiere organique figurée. *Revue de l'IFP*, Paris 24 (12), págs. 1417-1454.
- Demaison, G. L., 1973. Relationships of coal rank to paleotemperatures in sedimentary rocks. Editions du Centre de la Recherche Scientifique, págs. 217-224.
- Epstein, A. G.; Epstein, J. B. y Harris, L. D., 1975. Conodont color alteration. An index to organic metamorphism. U.S., Geol. Survey Open File Report. 75-379, pág. 54, figs. 1 tabla.
- Kartsev, A. A.; Vassoevich, N. B.; Geodekian, A. A.; Neruchev, S. G. y Sokolov, V. A., 1971. The principal stage the formation of petroleum. *Proceeding of the Eighth World Petroleum Congress.*, vol. 4, Applied Science Publishers, London.
- Masiuk, V. y Seiler, J. O., 1979. Informe micropaleontológico y de materia orgánica del pozo Y.P.F. Ch. F. x-1 (Facundo). Provincia del Chubut. Y.P.F. Gerenc. Planif. Geol., Area Lab. Geol., *informe inédito*, págs. 1-5, 1 gráfico.
- Quadros, L. P., 1975. Organopalinogía na prospecao de petróleo. *B. téc. Petrobras*, 18 (I), págs. 3-11.
- Salas, A., 1978. a) Estudio palinológico e interpretación del kerógeno del pozo YPF, St. R. x-12 (Salta-Ramos). Y.P.F., Gcia. Plan. Geol. Area Lab. Geol: (*Informe inédito*, págs. 1-3).
- , 1978 b) Estudio palinológico e interpretación del kerógeno del pozo YPF, St. Cu. x-1 (Cuchara). Pcia. de Salta, Y.P.F., Gcia. Plan. Geol. Area Lab. Geol. (*Informe inédito*, págs. 1-3).
- , 1978. c) Programa estudio micropaleontológico de unidades Carbónicas y Devónicas en el Chaco salteño. Estudio palinológico y de la materia orgánica del pozo S. To-1 (Tonono), Pcia. de Salta, Y.P.F., Gcia. Plan. Geol. Area Lab. Geol. *Informe inédito*, págs. 1-7, 2 gráficos.
- , 1979. a) Formaciones Tupambí y Tarija (Carbónico Noroeste argentino): madurez térmica; profundidades máximas de enterramiento; determinación de probables fallas y posibilidades como roca madre deducidas de la materia orgánica estudiada con luz transmitida. Y.P.F., Gcia. Plan. Geol. Area Lab. Geol. *Informe inédito*, págs. 1-16, 1 gráfico.
- , 1979. b) Estudio palinológico e interpretación del kerógeno del pozo YPF, St. R. x-15 (Ramos). Pcia. de Salta, Y.P.F., Gcia. Plan. Geol. Area Lab. Geol. *Informe inédito*, págs. 1-2.
- , 1979. b) Estudio palinológico e interpretación del kerógeno del pozo YPF, St. IN. x-1 (Icuá Norte). Pcia. de Salta, Y.P.F., Gcia. Plan. Geol. Area Lab. Geol: *Informe inédito*, págs. 1-5, 2 gráficos.
- , 1980. a) Estudio palinológico e interpretación del kerógeno del pozo S. PET. x-1 (Puesto el Tigre). Pcia. de Salta, YPF, Gcia. Plan. Geol. Area Lab. Geol. *Informe inédito*, págs. 1-5, 2 gráficos.
- , 1980 b) Nomenclatura para materia orgánica (en preparación).
- , 1980 c) Estudio palinológico y termopalínológico de pozos de la Cuenca Noroeste, Argentina: YPF, St. Cu. x-1 (Cuchara); YPF, St. Tr. xp-199 (Tranquilas); YPF, St. R. xp-11 (Ramos); YPF, St. R. x-12 (Ramos); YPF, St. R. x-15 (Ramos). Y.P.F., Gcia. Plan. Geol. Area Lab. Geol: *Informe inédito* en preparación
- Salas, A. y Seiler J. O., 1979. Unificación de gráficos palinológicos. Y.P.F., Gcia. Plan. Geol. Area Lab. Geol. *Informe inédito*, págs. 1-6, 1 gráfico.
- , 1980 a) Estudio palinológico y termopalínológico del pozo YPF, Nq. ECr.

- x-1 (El Cruce). Pcia. de Neuquén, Y.P.F., Gcia. Plan. Geol. Area Lab. Geol. *Informe inédito*, págs. 1-4, 1 gráfico.
- — , 1980. b) Termopalinología: Confiabilidad del método "Luz Transmitida". Y.P.F., Gcia. Plan. Geol. Area Lab. Geol. *Informe inédito*, págs. 1.16, 1 gráfico.
- Seiler, J. O., 1979. Informe microflorístico y de madurez térmica del pozo. YPF, Ch. CPB. es-1 (Cañadón Pastos Blancos). Provincia del Chubut. Y.P.F. Gcia. Plan. Geol. Area Lab. Geol. *Informe inédito*, págs. 1-4, 2 gráficos.
- , 1979. Informe microflorístico y de madurez térmica del pozo. Y.P.F. Ch. P. L.
- , x-1 (Pampa Lemán). Provincia del Chubut, Y.P.F. Gcia. Plan. Geol. Area Lab. Geol. *Informe inédito*, págs. 1-5, 1 gráfico.
- Seiler, J. O. y Salas, A., 1980. Termopalinología (en preparación).
- Staplin, F. L., 1969. Sedimentary organic matter, organic metamorphism and oil and gas occurrence: Bull. Can. Petroleum Geology, vol. 17, n° 1, págs. 47-66.
- Staplin, F. L.; Bailey, N. J. L.; Pocock, S. A. J. y Evans, C. R., 1973. Diagenesis and metamorphism of sedimentary organic matter Am. Assoc. Petroleum. Geol. Symposium Anaheim.
- Tissot, B. P. y Welte, D. H., 1978. Petroleum Formation and occurrence. Springer-Verlag., Berlin-N. York, págs. I-XVIII, 1-538.
- Wilson, L. R., 1971. Palynological Techniques-Deep-Basin Stratigraphy. Oklahoma City Geological Society. Vol. 21, n° 6, p. 124.



## COMO HACER PERMANENTES LAS PREPARACIONES PALINOLOGICAS EN GLICERINA-GELATINA

por JUAN CARLOS GAMERRO\* y ORLANDO CARDENAS\*

**ABSTRACT:** *How to make permanent palynological slides in glycerine jelly.* — A simple method to make permanent mounts in glycerine jelly is described. It is based in the hardness of the gelatine by formaline.

La glicerina--gelatina es uno de los medios de montaje de más amplia difusión en preparaciones palinológicas debido entre otras razones a su buen índice de refracción, 1.48-1.49 (una vez evaporada el agua que contiene), y a la facilidad de su manejo, por tratarse de un medio acuoso donde el residuo palinológico puede montarse directamente sin necesidad de deshidratación previa.

Sin embargo, su mayor desventaja reside en que no endurece lo suficiente y las preparaciones son difíciles de preservar y guardar, sobre todo en condiciones de temperaturas elevadas, aún bordeando o sellando el cubreobjetos con alguna laca o esmalte.

En paleopalínología esto representa un inconveniente relativamente serio, pues es sabido que en estas preparaciones es muchas veces necesario ubicar por medio de coordenadas, especímenes seleccionados (holotipos, paratipos, etc.), para su eventual reestudio u observación posterior. Al carecer la glicerina-gelatina de firmeza y consistencia, esos especímenes podrían sufrir desplazamientos y cambios de posición con los consiguientes trastornos que ello acarrearía.

Para conferir a ese medio la suficiente firmeza y estabilidad conservando al mismo tiempo sus buenas cualidades ópticas, hemos hecho uso de la propiedad que posee el formol de desnaturalizar y endurecer la gelatina y otras sustancias proteicas. Esta propiedad del formol ya fue utilizada para los mismos fines por Forti en 1902 (Langeron 1949, pág. 703), pero su uso ha sido poco considerado en años posteriores.

Tres son los procedimientos que pueden utilizarse para realizar o conservar las preparaciones.

\* Unidad de Paleobotánica y Palinología. Centro de Investigaciones en Recursos Geológicos. Miembro de la Carrera del Investigador Científico y de la Carrera del Técnico del CONICET, respectivamente.

## DOBLE MONTAJE

**Materiales**

Porta y cubreobjetos (24 × 32 mm) bien desengrasados.

Glicerina-gelatina (fórmula de Kisser, Erdtman 1952).

Solución de formol: formol comercial 5 ml, glicerina 5 ml, agua destilada 90 ml.

Aguja con su extremo doblado en ángulo recto unos 5 mm.

**Procedimiento**

- 1) Suspender el residuo palinológico en la solución de formol aproximadamente en la proporción de 1 de residuo: 8 de solución.
- 2) Adherir el cubreobjetos sobre el portaobjetos con una gota de H<sub>2</sub>O destilada. Previamente anotar sobre este último los datos identificatorios del residuo palinológico.
- 3) Colocar sobre el cubreobjetos un trozo de glicerina-gelatina juntamente con una gota de aproximadamente igual volumen, de la suspensión del residuo en formol.

La proporción en que se diluye el residuo con el formol, y las cantidades del mismo y de glicerina-gelatina a colocar sobre el cubreobjetos, son valores que solo pueden estimarse a través de la práctica; lo importante es obtener sobre el cubreobjeto una delgada capa de medio de montaje, donde las partículas orgánicas estén libres unas de otras sin superponerse ni estar demasiado dispersas entre sí.

- 4) Calentar suavemente sobre una platina caliente (40°-50° C) o sobre mechero de alcohol hasta licuar la glicerina-gelatina. Con la aguja doblada se mezcla y homogeneiza bien el residuo con la glicerina-gelatina y se la extiende por toda la superficie del cubreobjetos dejando solo libre en los bordes una faja de unos 2 mm de ancho. Si se forman burbujas, éstas pueden eliminarse tocándolas con la punta de una aguja caliente.

El calor empleado para licuar la glicerina-gelatina no debe sobrepasar nunca los 40°-50° C, y la mezcla del residuo debe hacerse lo más rápidamente posible, para evitar el endurecimiento prematuro de la gelatina por acción del formol.

- 5) Sobre un soporte adecuado se lleva todo a la platina caliente o estufa (40°-50° C) durante unos 15 minutos, tiempo suficiente para que la glicerina-gelatina endurezca y se elimine casi toda el agua que contiene. Esto se comprueba tocando los bordes de la misma con una aguja para probar su consistencia. Durante el secado el conjunto porta y cubreobjetos debe permanecer bien horizontal.
- 6) Para fijar el cubreobjetos sobre el portaobjetos, se retira el primero de ellos y sobre el segundo se coloca en cantidad proporcional al tamaño del cubreobjetos un trozo de glicerina-gelatina más una gota de la solución de formol (sin residuo) de volumen equivalente. Se lo licua al calor suave como anteriormente, se mezcla bien con la aguja limpia, se invierte el cubreobjetos con el medio de montaje hacia abajo y se lo

coloca sobre la gota que está en el portaobjetos presionando ligeramente para que ésta se extienda bajo toda la superficie del mismo.

- 7) Luego se coloca el preparado sobre la platina caliente o estufa a  $50^{\circ}$ - $60^{\circ}$  C durante unos 15 a 20 minutos, tiempo suficiente para que la gelatina endurezca. Si bien es posible usar las preparaciones a partir de este momento, es conveniente dejar estas varias horas sobre la platina o estufa para que se evapore toda el agua que contiene el medio de montaje.

De esta forma pueden revelarse deficiencias, como pequeñas áreas secas debidas a una mala mezcla de la glicerina-gelatina con la solución de formol, que en caso de ser muy importantes llevarían a desechar la preparación.

- 8) Si quedan restos de glicerina-gelatina en los bordes del preparado, estos se eliminan fácilmente por medio de un escalpelo al final del proceso, y se limpia con un algodón humedecido en agua.

La acción desnaturalizante del formol sobre la gelatina es irreversible, de modo que ésta pierde su capacidad de licuarse. Por lo tanto las preparaciones son permanentes y sin peligro de alteraciones posteriores. En nuestro laboratorio existen preparados con más de un año de antigüedad sin que presenten el menor signo de alteración.

Una importante recomendación es que se mezcle muy bien la glicerina-gelatina con la solución de formol, pues de lo contrario pueden aparecer posteriormente pequeñas áreas secas en el seno del preparado como ya fue señalado anteriormente.

En resumen, las preparaciones así realizadas presentan las siguientes ventajas:

Uso prácticamente inmediato.

Gran durabilidad, son permanentes, conservando al mismo tiempo las excelentes cualidades ópticas de la glicerina-gelatina.

No hace falta sellado o bordeado con lacas.

Resisten temperaturas de  $70^{\circ}$  C o más sin modificarse.

Los palinomorfos se hallan muy cerca del cubreobjetos y casi todos en un mismo plano focal. Ello facilita mucho la observación microscópica con objetivos de inmersión de fuerte aumento.

#### MONTAJE SIMPLE

Cuando se trate de preparaciones para trabajos de tipo rutinario (informes comerciales o técnicos) donde deben realizarse gran cantidad de preparados, puede simplificarse el montaje haciéndolo directamente sobre el portaobjetos.

Para ello se coloca sobre el mismo en cantidad adecuada al tamaño del cubreobjetos, un trozo de glicerina-gelatina y aproximadamente el mismo volumen de suspensión del residuo palinológico en formol. Se licua la glicerina-gelatina al calor suave, se mezcla bien con la aguja y se coloca el cubreobjetos ejerciendo leve presión de modo que quede entre porta y cubreobjetos una delgada capa de medio de montaje.

ASOCIACION  
LATINOAMERICANA DE  
PALEOBOTANICA Y  
PALINOLOGIA



BOLETIN Nº 7

BUENOS AIRES  
1980

ISSN 0325-0121