



El **Dr. Sanjeet K. Verma** obtuvo el grado de Doctor en Ingeniería (UNAM, 2012). Estancia Posdoc en la Universidad de Campinas (2012-2015). Ingresó al IPICYT en 2015. Actualmente es Jefe de la División de Geociencias Aplicadas, Investigador Titular C, Nivel II en SNII. Líneas de investigación: i) geoquímica de las rocas, ii) petrogenesis ignea, iii) ambiente tectónicos y iv) geocronología. Es editor Asociado de la revista Geochemistry y Miembro Editorial de la Revista Discover Geoscience. Miembro de la Academia Mexicana de Ciencias (2017). Premio de Newton Advanced Fellowship, The Royal Society (2016). Es autor de 50 publicaciones JCR. Tutor del Posgrado en la DGA/IPICYT. Su obra cuenta con más de 1200 citas bibliográficas; Índice H de 18. Ha supervisado 6 tesis de Licenciatura; 7 de Maestría; y 3 de Doctorado.



María Fernanda Cerca Ruiz. Se graduó como Ingeniera Geóloga por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) en 2020, titulándose por tesis. Posteriormente, obtuvo el grado de Maestra en Ciencias en Geología Aplicada por la misma institución en 2022. Cuenta con experiencia en el estudio de flujos granulares volcánicos, su dinámica y reología, así como en vulcanismo monogenético y riesgos volcánicos. Ha participado en investigaciones de campo, análisis de imágenes, geofísica, petrología y cartografía.



Dr. Alejandro Carrillo-Chávez. Ingeniero Geólogo del Instituto Politécnico Nacional, Maestría en La Universidad de Cincinnati, y Doctorado en la Universidad de Wyoming. Inició su trabajo en el Instituto Mexicano del Petróleo y después inició vida académica en la Universidad Autónoma de Baja California Sur. En 1998 ingresó a la Unidad Investigación en Ciencias de la Tierra (UNICIT) UNAM, Campus Juriquilla (actual Centro de Geociencias). Su trabajo inicial fue sobre petrografía ígnea y metamórfica. En academia inicio dando clases de petrología ígnea y metamórfica.

Actualmente es Tutor del Posgrado en Ciencias de la Tierra UNAM. Su maestría fue sobre yacimientos minerales metálicos y su doctorado sobre geoquímica ambiental. Actualmente sus líneas de investigación son: Metales Pesados en Medio Ambiente, Hidrogeoquímica, Geoquímica Isotópica de Metales Pesados e Hidrogeoquímica de Salmueras Petroleras. A la fecha es responsable de un Proyecto UNAM y CONAHCYT sobre Concentraciones de metales e isotopía estable de Zn y Hg en agua de lluvia, nieve y núcleos de hielo en glaciares mexicanos. ambiente@geociencias.unam.mx



El **Dr. Juan Josué Enciso Cárdenas**, es Profesor Investigador de Tiempo Completo del Centro de Investigación en Geociencias Aplicadas de la UAdeC y es miembro distinguido del SNI CONAHCYT. Su especialidad en geoquímica orgánica, le permite enfocar su línea de investigación al estudio, caracterización y evaluación de potencial de yacimientos de hidrocarburos no convencionales para su desarrollo y aprovechamiento en México. jenciso@uadec.edu.mx



El **M.C. Genaro de la Rosa Rodríguez**, es Profesor Investigador de Tiempo Completo del Centro de Investigación en Geociencias Aplicadas de la Universidad Autónoma de Coahuila (UAdeC). Es Ingeniero en Recursos Minerales y Energéticos, cuenta con Maestría en geología de yacimientos de hidrocarburos no convencionales por la UAdeC. 6 años de experiencia como geólogo en el Servicio Geológico Mexicano (SGM) en el proyecto Gas Asociado al Carbón y rocas generadoras de hidrocarburos en México. Es miembro distinguido como Investigador Estatal Junior ante el Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología (COECYT) de Coahuila. Su especialidad es la petrografía orgánica y está acreditado en carbón, mezclas de carbón y materia orgánica dispersa ante el International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP). genaro_rodriguez@uadec.edu.mx

Transformación de la materia orgánica ayer y hoy para formar combustibles

Demetrio Marcos Santamaría Orozco

santamade59@gmail.com

Resumen

Actualmente, más del 75% de la energía que mueve al mundo proviene de las energías fósiles: carbón, petróleo y gas natural. Estos tienen sus ventajas como: son abundantes, naturales, baratos, fácil de extraer, transportar y almacenar, así como fácil de refinar, procesar y transformar en otros productos. Sin embargo, también tiene sus desventajas, debido a que: son finitos y altamente contaminantes, debido a que liberan gases como CO₂ y CH₄ que, favorecen el efecto invernadero ya que incrementa la temperatura de la superficie del planeta y esto a su vez, provoca cambios climáticos.

Por estas razones surge la necesidad de ir sustituyendo los combustibles fósiles por energías alternas, como las renovables, que aparentemente son menos contaminantes. Una de estas energías es que se produce con la biomasa, la cual tiene en común con las anteriores que, sus precursores son materiales orgánicos transformados a combustibles de manera artificial, mientras que en las primeras su generación ocurre de forma natural y generalmente este proceso tarda millones de años.

Este trabajo explica cómo ocurre la transformación de la materia orgánica contenida en las rocas generadoras y que tipo hidrocarburos pueden formar; sólidos, líquidos o gaseosos, así como que características tuvieron los principales horizontes generadores de petróleo y gas, a través de la historia geológica de nuestro planeta. En contraste también, se explica como ocurre la transformación de la biomasa a combustibles líquidos y gaseosos.

Sin embargo, para disminuir la huella de carbono en todo el planeta se requiere que los países industrializados dejen de producir esas enormes cantidades de CO₂ y CH₄, ya que sucede lo mismo de los combustibles fósiles. El 75% de las emisiones a la atmósfera, lo generan sólo 20 de las 193 naciones reconocidas por la ONU y el resto de las naciones 173 producen el otro 25% de los gases contaminantes; esas que están en vías de desarrollo.

Introducción

Historia de los combustibles usados por el hombre y evolución de las energías

Desde la antigüedad hace más de 100 mil años A.C. el *homo sapiens* ha buscado su bienestar. Cuando descubrió el fuego vio las ventajas, no sólo de calentarse en épocas de frío o cuando se mojaba, sino también que, iluminaba en

la oscuridad y que los alimentos cocidos y calientes cambiaban su sabor y eran más fáciles de digerir. Por muchos años los principales combustibles fueron la hierba seca y la madera, después las breas de las plantas o el cebo de los animales complementaron a estos combustibles. Sin embargo, el incremento demográfico, llevo al ser humano a descubrir y ocupar nuevos territorios, los hombre y mujeres se adaptaron a nuevos entornos, con distintos climas.

En la antigüedad, para desplazarse grandes distancias usaban animales y carretas en tierra o los cauces de ríos, así como los mares utilizando canoas, lanchas y barcos, con remos o con velas, se aprovechaban de las corrientes acuáticas o de viento.

También usaban el agua de los ríos para mover molinos y a estos le adaptaban rocas circulares para triturar granos, para sus reservas alimenticias. En todo periodo de 2000 A.C. a 1700 D. C. no hubo grandes avances tecnológicos, hasta el siglo XVIII D.C. comienza el desarrollo de la tecnología, la conquista de nuevos territorios por el hombre y la extinción de muchas especies terrestres, aéreas y marinas.

Conforme avanzaba la tecnología aumentaban las necesidades de ser humano, ya sea para viajar grandes distancias en menos tiempo, para cultivar más áreas y tener más alimentos, o bien, para colonizar a países poco tecnificados y así sobreexplotar sus recursos naturales. Fue cuando surgió la revolución industrial (1760-1840) y entró la época del carbón, ganando adeptos las máquinas de vapor. Años más tarde se desarrollaron tecnologías para extraer petróleo y gas natural (con el primer pozo de la historia el Bibi-Heybat, en 1846 en Bakú, Azerbaiyán, años después en 1859 fue perforado el pozo El Coronel por Edwin Drake, quien utilizó una plataforma de perforación en Oil Creek, Pensilvania, Estados Unidos).

En 1870 inicia la era de los combustibles fósiles, porque es cuando surgen el motor de combustión interna (desarrollado por el ingeniero alemán Nikolaus August Otto) y a partir de ahí y hasta la fecha, el petróleo y el gas natural se convierten en los principales energéticos de la humanidad. Cabe destacar que los hidrocarburos también generaban electricidad en las plantas termoeléctricas (la primera fue la Central de Pearl Street, construida en 1871 por Thomas Alva Edison en Nueva York, EUA).

Los principales combustibles tenían sus ventajas y desventajas, puesto que el desarrollo de la industria, armamento, construcción, minería, etc. en las naciones occidentales se basó en estas. y así crecieron económicamente, sin embargo, no fue igual para las naciones orientales y colonias de las anteriores o en vías de desarrollo.

A partir de 1950 hubo un incremento demográfico del ser humano de manera exponencial, quizás por el uso masivo de vacunas, antibióticos y mejores hábitos higiénicos en la población en general (Figura 1). Debido a lo anterior,

también se incrementó la demanda de recursos naturales, como madera, alimentos, acero, metales y no metales, y su extracción y transformación produjo un incremento en los gases contaminantes como el CO₂ y CH₄, y 70 años después empezaron a modificar el clima, creando un efecto invernadero, esto impactó directamente a los ecosistemas y medios ambientes.

La demanda energética era tal, que a mediados de siglo XX afortunadamente surgen tecnologías innovadoras y

florece las energías renovables. Se diseñan y fabrican plantas hidroeléctricas, geotérmicas y nucleares, así como procesadoras de biomasa, finalmente dos décadas antes de terminar el siglo XX e inicios del siglo XXI surgen otras tecnologías emergentes y se desarrollan ventiladores y turbinas de aire, de igual manera turbinas de mareas. También se construyen paneles solares y finalmente, se sintetiza y separa para obtener el hidrógeno verde (Figura 2).

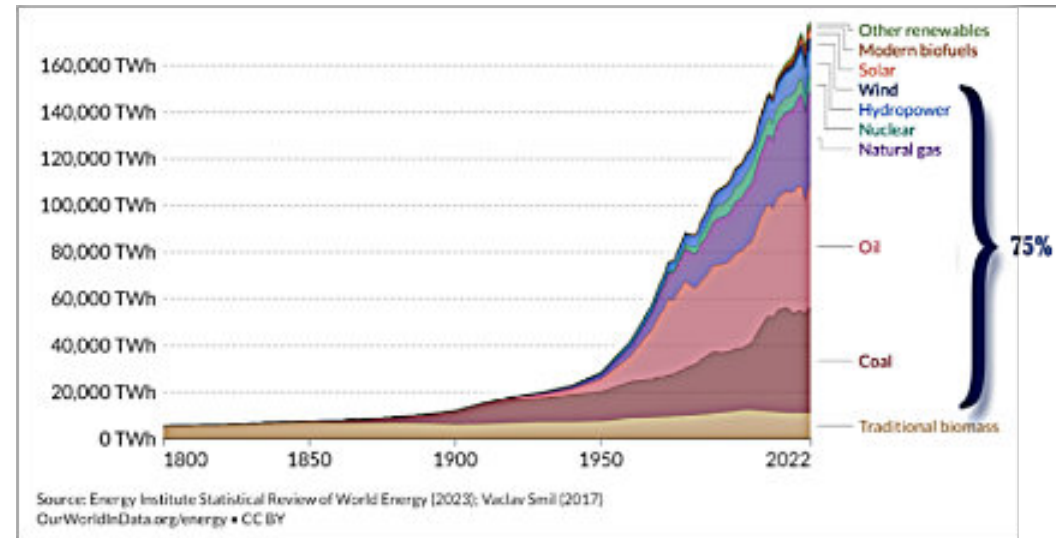


Figura 1. Consumo de energía primaria a nivel global y por tipo de energía fósil o renovable. Fuente: <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>



Figura 2. Evolución de los tipos de energías que ha y sigue utilizando el hombre.

Objetivos

Mostrar cómo se transforma la materia orgánica fósil dentro de las rocas sedimentarias a través de millones de años para formar combustibles fósiles y como se convierte los pellets de la biomasa en uno pocos días en

combustibles orgánicos similares a los anteriores, a fin de saber que los une o los diferencia. Explicar las ventajas y desventajas de las energías alternas vs los combustibles fósiles para planificar de manera estratégica y controlada la transición energética en México y el mundo en las siguientes décadas.

II Desarrollo del trabajo.

Evolución de la geología y la vida

La historia de la Tierra está grabada en las rocas. Se ha calculado, por métodos radiométricos, que, la Tierra tiene aproximadamente 4567 millones de años (Ma) (Amelin, et al., 2002) y que, la vida inició en ella hace aproximadamente 3456 Ma, debido a que se encontraron rocas con bacterias fosilizadas, ambas cifras son aproximadas y se utilizan para facilitar la nomenclatura. Con base a dataciones radiométricas, en muchas ocasiones de zircones, y de restos orgánicos fósiles se ha elaborado la Tabla Cronoestratigráfica Internacional (TCI) que publica año tras año la *International Commission on Stratigraphy*, ICS perteneciente a la *International Union of Geological Sciences*, IUGS. Este documento integra la



Figura 3. Breve descripción de la historia geológica de nuestro planeta y la evolución de la vida.

<https://www.usgs.gov/media/images/geologic-time-spiral-usgs-general-information-product-58>

Además, el resultado de la evolución en fotosíntesis más eficiente fue que producían oxígeno molecular como bioproducto. El oxígeno se comenzó a acumular en la atmósfera, las células evolucionaron cambiaron la habilidad para usar la respiración celular hace más de 2,000 Ma. Ya para el Fanerozoico hace 542 millones de años, se observa un cambio drástico en la evolución de las especies y se desarrollan algunos organismos mucho más estructurados y complejos que, contaban con sistemas respiratorios, circulatorios, respiratorios y digestivos pluricelulares, ya sean plantas o animales (Figura 3). La evolución de los animales inicia en el mar con organismos eucariotes, crustáceos, peces, insectos, anfibios, reptiles, aves, para terminar con los mamíferos, muchos de ellos se van adaptando a distintos ecosistemas. Por el lado de las plantas, inician con algas, clorofitas /carofitas, hepáticas, musgos, licopodios, helechos, palmeras, arboles, gimnospermas (tipo coníferas) y angiospermas (tipo magnolias), plantas con flores y frutos, finalmente pastos y cereales.

La materia orgánica (Mo) en el planeta

Aunque en cada época de la historia de la Tierra según el registro de la TCI hay indicios de horizontes con abundante material orgánico, pero están restringidos a ciertas regiones del planeta. Para considerar que una roca es potencialmente generadora, debe tener más 1 % de carbono orgánico total (COT o TOC en inglés) y alcanzar la madurez térmica para generar hidrocarburos., sólidos, líquidos o gaseosos.

Por otra parte, el mapa geológico del mundo da una idea general de donde están las rocas más antiguas y donde las más recientes, si son de piso marino o continental. Así como, si son ígneas, metamórficas y sedimentarias, y en qué tipo de ambientes tectónicos abundan más de cierto tipo. Por ejemplo, las rocas ígneas en los arcos volcánicos y zonas de subducción, mientras que, las rocas sedimentarias en las cuencas y márgenes pasivos.

Las mayores producciones de vida desde el Paleozoico hasta el reciente se han concentrado en los climas cálidos

(entre los trópicos), húmedos, con radiación solar propia para desarrollar la fotosíntesis, en las selvas, bosques y plataformas continentales, sobre todo en los arrecifes y mares someros de las márgenes pasivas. Y los géneros han estado en constante evolución y muchas especies se van adaptando a los cambios graduales o bruscos que han ocurrido y siguen ocurriendo en la naturaleza, otras especies simplemente desaparecen.

Se ha documentado que durante el Fanerozoico han ocurrido varias extinciones masivas de especies terrestres y marinas en todo el planeta. Siete de estos tuvieron más de 40% de la devastación de la vida en el planeta y de esas están relacionadas con catástrofes propias de la Tierra o por perturbaciones extraterrestres. O bien por la combinación de causas biológicas, geológicas, climáticas y alteraciones cósmicas.

Por ejemplo; 1) impactos de cuerpos extraterrestres, asteroides o cometas, 2) grandes erupciones volcánicas, 3) cambios climáticos, 4) eventos anóxicos, 5) incremento de CO₂ por hipercapnia, 6) incremento de H₂S y acidificación de los océanos. También puede ser por otras causas como pérdida de nutrientes y cambios de temperatura (Bambach, 2006)

Transformación de la Mo fósil para formar hidrocarburos

Para formar hidrocarburos o combustibles fósiles como carbón, petróleo crudo y gas natural se requiere varias condiciones físico-bioquímicas o termodinámicas. Lo primero que hay que buscar son los horizontes estratigráficos ricos en COT, los cuales están asociadas a paleo-ambientes específicos que son propicios para producir, preservar y almacenar grandes cantidades de materia orgánica y dependiendo del tipo de Mo, así como de su ambiente sedimentario dará lugar a los tres tipos de kerógeno (Tissot y Welte, 2013; Hunt 1995).

Por ejemplo: el carbón está relacionado a ambientes continentales con abundantes plantas mayores, los cuales se pueden encontrar en pantanos, lagunas y marismas (kerógeno tipo III).

El petróleo y gas natural, ya sea pesado, petróleo medio y ligero, junto con gas asociado y gas seco está asociado a ambientes marinos cerca de las plataformas continentales en márgenes pasivas, en cuencas intra – plataformas (kerógeno tipo II), este tipo de kerógeno es el que tiene las mayores reservas y producciones del mundo.

El petróleo casi sin gas asociado está relacionado a ambientes continentales como lagos de agua dulce, o poco salados (kerógeno tipo I), (Figura 4).

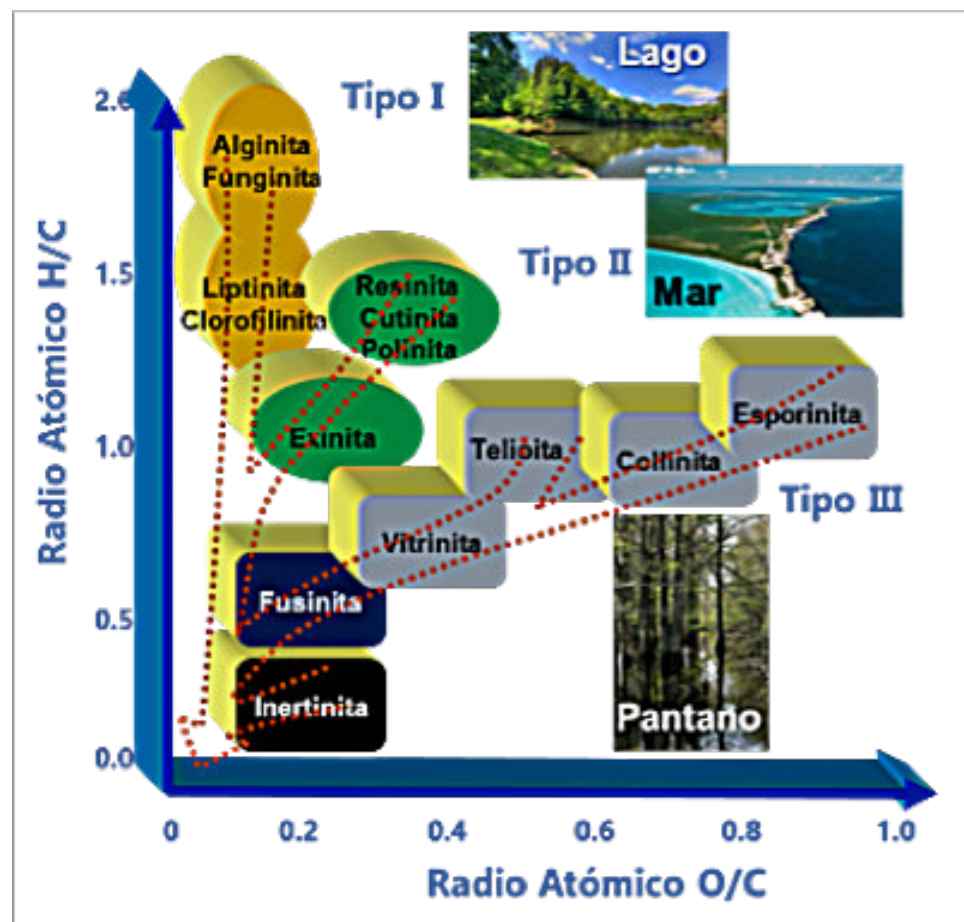


Figura 4. Tipos de kerógeno, Modificado de Van Krevelen, 1961 con innumerables datos de Pirolisis Rock-Eval y Petrografía Orgánica de varias áreas del mundo.

Lo siguiente que hay que investigar es la madurez térmica que haya alcanzado la materia orgánica fósil en las capas estratigráficas ricas en COT, de temperatura ambiente hasta los 65 o 80 °C es la etapa diagenética, debido a que el inicio de formación de los hidrocarburos varía de 65 a 80°C dependiendo del tipo de kerógeno y la terminación de generación de hidrocarburos líquidos, esta es la etapa catagenética de 65 a 180°C. Finalmente, llega la etapa meta-genética que va de 180 a 250 °C, también dependiendo del tipo de kerógeno (Figura 5).

Para formar petróleo en forma natural se requiere de una cocina de generación y de un sistema petrolero, que tenga los elementos, procesos y la sincronía para formar un yacimiento petrolero, con la cantidad necesaria que sea económicamente explotable.

La catagénesis es la etapa correspondiente a ventana de generación de petróleo, y la metagénesis a la de gas. Cabe destacar que las tasas de calentamiento en este tipo de rocas sedimentarias varían de 0.3 a 3.5 °C por millón de años (Ma) teniendo un promedio de 1 °C/Ma. También expresado en 1×10^{-11} y 1×10^{-16} °K. El tipo de materia orgánica (precursores), las tasas de calentamiento y sus condiciones de oxigenación juegan un papel importante en los tipos de compuestos orgánicos (resultados) a obtener (Figura 6).

El incremento de temperatura en el laboratorio puede variar de 25°C/min a 0.1 °C/min. Mientras que en la naturaleza ese incremento ocurre en el subsuelo, donde la tasa de calentamiento promedio es de 1°C/Ma, debido a dos factores, 1) al gradiente geotérmico (GG) de cada

región, esto significa que en promedio la temperatura aumenta 3 °C cada 100 m de profundidad o 30 °C cada kilómetro, valores menores se considera una zona hipotérmica y valores mayores una zona hipertérmica. También es importante destacar su ambiente tectónico y su relación con 2) el flujo de calor (FC), en zonas cercanas a dorsales marina o zonas volcánicas los valores de FC van de 150 a 450 mW/m², mientras que, en zonas alejadas a estas, en márgenes pasiva o cratones, van de 20 a 50 mW/m².

Las características comunes de los ambientes de depósito de los sedimentos ricos en materia orgánica son: todos son acuáticos y la interfase agua/ sedimento es primordial en la producción de grandes cantidades de Mo, casi siempre tiene baja hidrodinámica, los medios ambientes son reductores, sub-óxico o anóxicos. Mientras que, una vez que los sedimentos se convierten en rocas generadoras por el incremento de enterramiento o sepultamiento, así como de la presión y temperatura. Esta última aumenta, pero en ausencia de oxígeno, lo que descompone por acción del calor o craqueo de los compuestos químicos y se conoce como la pirólisis.

Transformación de la Mo reciente para formar biocombustibles

En México, la biomasa se produce a partir de subproductos agrícolas como: restos de maíz, trigo, sorgo y cebada, pencas de agave, hojas y punta de corte en verde, cáscara y fibra de coco. Primero, se recolecta y prepara la biomasa, se eliminan residuos, humedad y otros contaminantes. Las materias primas pueden ser 1)



Figura 5. Esquema simplificado de la transformación de la materia orgánica fosilizada. Tomado de Santamaría et al., 2008.

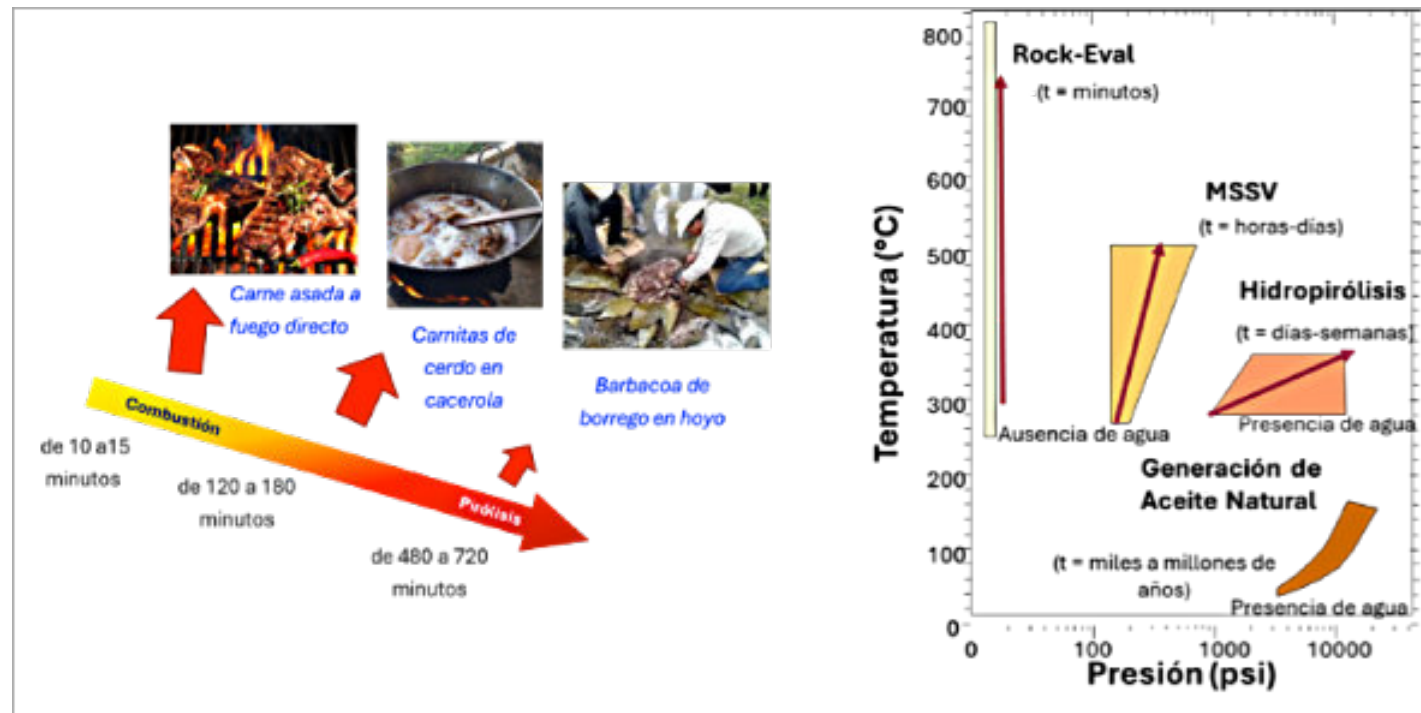


Figura 6. Transformación de la materia orgánica, tres ejemplos de la cocción de carnes en condiciones ambientales, desde la combustión hasta el pirólisis simple, el calentamiento se lleva a cabo con o sin oxígeno. A la derecha se muestran tres tipos de pirólisis de laboratorio, con su variación en la tasa de calentamientos y una comparación con la tasa de calentamiento promedio que ocurre en la naturaleza. (Modificado de Ruble et al., 2003).

azúcares simples: Caña de azúcar, remolacha, melaza. 2) almidones: Maíz, trigo, sorgo, y 3) celulosa: Residuos agrícolas, bagazo de caña, madera (biomasa lignocelulósica). Todas ricas en carbohidratos.

Segundo, conversión primaria de la biomasa en biocombustible, se trituran y se muelen para convertirlos en pellets y de ahí se utilizan técnicas de pirólisis, a través de calderas, reactores y procesos de refinación, después utilizar diferentes técnicas que eleven la temperatura, como: combustión directa, gasificación termoquímica en ambiente reducido en oxígeno para producir gas de síntesis, pirólisis craqueo térmico en ausencia de oxígeno para obtener bio-aceites. Hidrólisis y fermentación, así como, conversión de azúcares para obtener bioetanol e hidrocarburos aromáticos, esterificación de triglicéridos para formar biodiesel.

Tercero, se refina y procesan los productos obtenidos. A diferencia de la transformación natural que requiere millones de años y temperaturas de 60 a 200 °C para convertir hidrocarburos a partir de la descomposición del kerógeno, en este caso el proceso dura días o semanas y su intervalo de temperaturas va de 400 a 1,000 °C, usando los restos de organismos, en la mayoría de los casos plantas mayores terrestres, (Alonso et al., 2010), (Figura 7)

La cantidad de tierra cultivable necesaria para plantar las especies anteriormente citadas para producir los combustibles (biodiesel o bioetanol) va de cientos a miles de hectáreas. Lo que afecta en gran medida la

biodiversidad del medio ambiente, cuando los sembradíos son mono cultivos y se invaden hábitats naturales de otras especies, se desgasta rápidamente la tierra, incluidos los bosques. Además, los precios de estos bicomcombustibles son 25% más caros.

Para formar biocombustibles además de la Mo se requiere de instalaciones como calderas, hornos, turbinas, separadores, destiladores y otros equipos de refinación.

Capas estratigráficas generadores de HCs

Según Grunau, 1983, Klemme y Ulmishek, 1991 existen seis grandes horizontes estratigráficos generadores de hidrocarburos, tres del Paleozoico, otros dos de Mesozoico y uno del Cenozoico, siendo los de Mesozoico los que ostentan más de la mitad de las reservas del mundo (Figura 8).

La distribución geográfica de estos dos horizontes del Mesozoico se ubica en las márgenes pasivas del antiguo mar de Tetis, ese océano que separó al super continente en dos al llamado Pangea, Laurasia al norte y Gondwana al sur. El 80% de su petróleo es tipo II, asociado a ambientes sedimentarios marinos, sobre todo en las cuencas intercontinentales del Jurásico Superior y las plataformas carbonatadas Cretácico Superior.

En México, además, los aceites crudos son ricos en compuestos con azufre, asociados directamente a los ambientes sabkhas (planicies con desarrollo de evaporitas, haluros y sulfatos) establecidos durante el

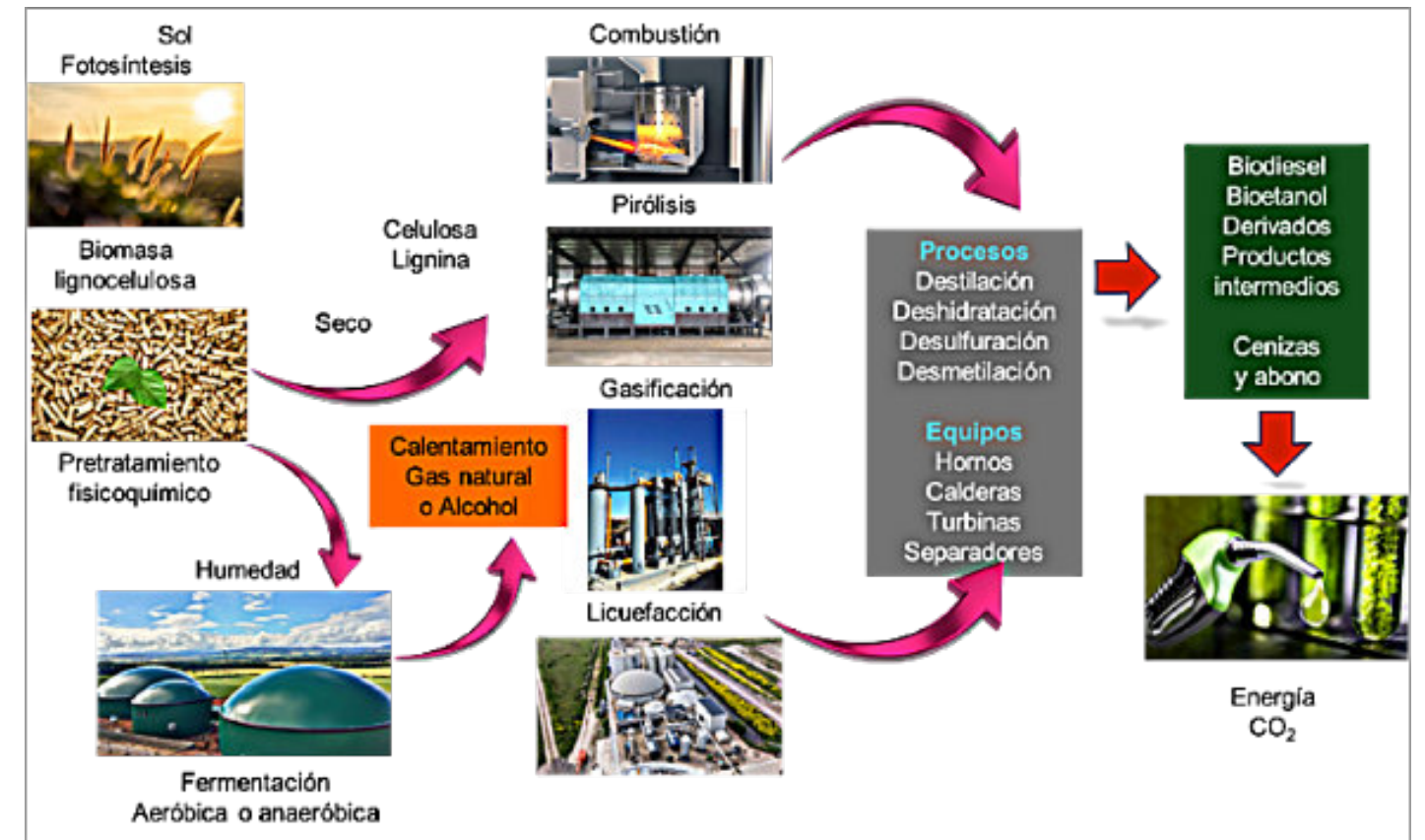


Figura 7. Esquema simplificado de la transformación de la materia orgánica reciente, proceso de la biomasa a combustibles derivados.

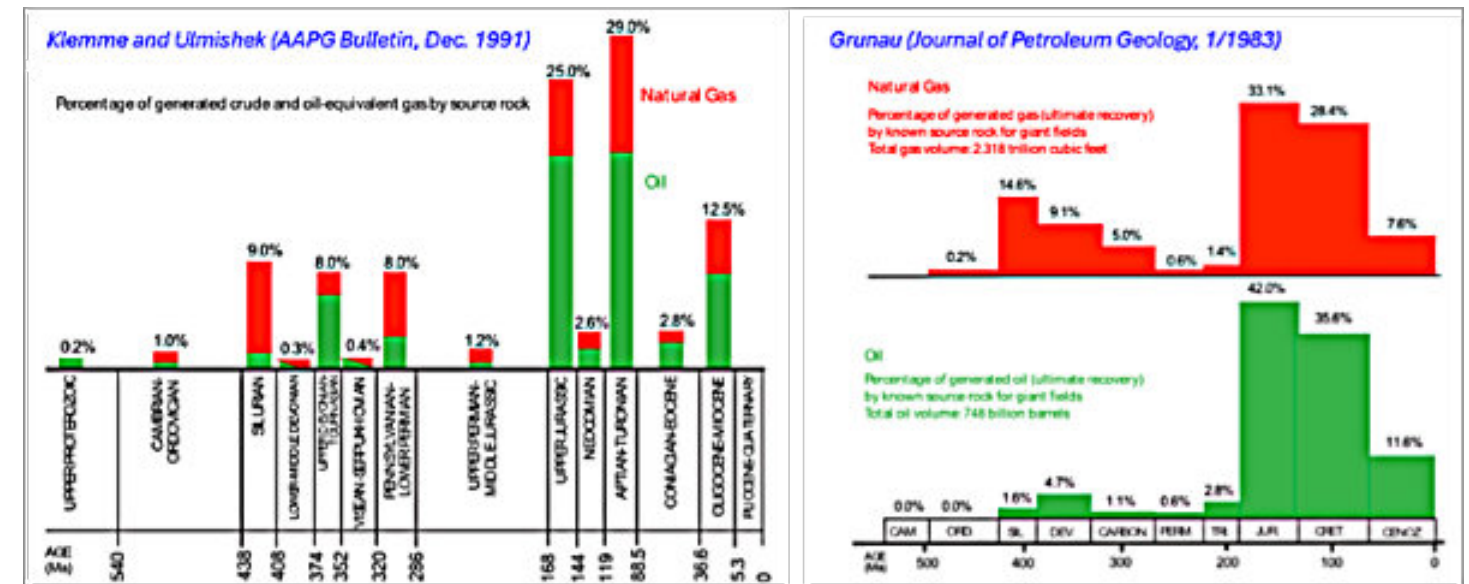


Figura 8. Principales horizontes estratigráficos que contienen rocas generadoras de petróleo crudo y gas natural en el mundo.

Calloviano, siendo el principal horizonte generador de petróleo crudo y gas natural es el Jurásico Superior (Tithoniano).

Balance del material orgánico

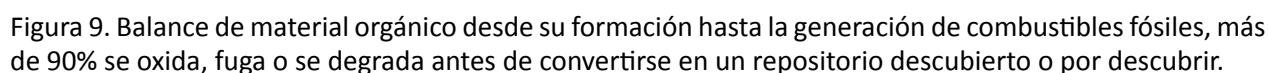
Cuando se llega a tener las condiciones geológicas necesarias que originaron los 6 horizontes ricos en COT a

lo largo del tiempo geológico y sólo en ciertas regiones del planeta en cada uno de esos tiempos, sólo el 12% es preservado y de ese porcentaje, únicamente el 1% es transformado en combustibles fósiles.

Cuando se llega a tener las condiciones geológicas necesarias que originaron los 6 horizontes ricos en COT a

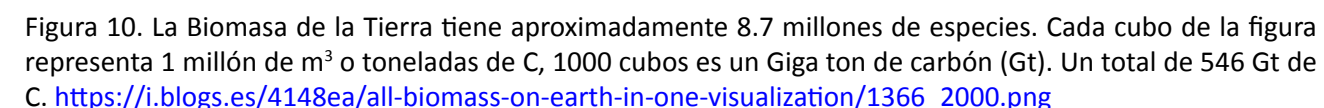
Por el contrario, para la biomasa tiene un gran potencial en términos de eficiencia y sostenibilidad, pero su impacto va a depender de cómo se gestione. Respecto a la

En conclusión, la biomasa tiene un gran potencial como recurso renovable eficiente y sostenible si se emplean tecnologías adecuadas, siempre y cuando se gestione de forma responsable.



Sin embargo, cabe destacar que de ese 0.05 % descubierto y producido, solo se logra extraer el 60 % y el 40 % queda atrapado dentro del yacimiento.

Actualmente en la Tierra se producen grandes cantidades de materiales orgánicos más de 546 GT de carbono orgánico (Figura 10), la mayoría de los seres vivos están



Capas de la Tierra

La Tierra está compuesta en general por múltiples capas concéntricas, comenzando con el centro donde se ubica el núcleo interno, le sigue el núcleo externo, la astenosfera o manto interno y el manto externo, luego la litosfera (corteza oceánica y corteza continental), seguida de la hidrósfera y finalmente la atmósfera. Esta última se ha subdividido en tropósfera, estratósfera y mesósfera, por último, están las capas más externas como la termósfera y exósfera. Estas capas varían en composición química, mineralógica y elemental. Los compuestos pesados se encuentran en las primeras capas y es ahí donde hay elevadas temperaturas y presiones. Del centro hacia afuera también, hay variaciones en sus estados físico y van de sólidas a líquidas y después gaseosas. Todo lo anterior con respecto a la densidad, composición química y mineralógica, temperatura y presión en el planeta.

En la hidrósfera el elemento más abundante es el agua H_2O (~96.5%), seguido de Cl (1.9 %), Na (~1.05 %), SO_4 (~0.0262 %), Mg (~0.0126 %), HCO_3 (~0.0014 %), Ca



Figura 11. La biosfera es la capa de la Tierra donde habitan las especies marinas y terrestres del planeta. Está compuesta por otras tres capas la Litosfera, Hidrosfera y Atmósfera.

(~0.004 %), K (~0.0038 %), B (~0.0013 %), Sr (~0.0002 %), Br (~0.0001 %), F, (~0.00007 %).

Por otra parte, la litosfera está compuesta principalmente por el dióxido de silicio o sílice SiO_2 , siendo el elemento más abundante el O (~47 %), seguido de Si (~28 %), Al (~8 %), Fe (~4.5 %), Ca (~3.5 %), K (~2.5 %), Na (~2.5 %), y Mn (~2.2 %), (Figura 12).

Producción de CO_2

Como se mencionó en párrafos anteriores, en la Tierra han ocurrido una serie de extinciones masivas de especies orgánicas a lo largo de más de 2 mil millones de años, sin embargo, cuando los organismos fueron complejos y evolucionaron hasta los seres vivos que hay en la actualidad fue a partir del Paleozoico hace 542 millones de años, en ese periodo han ocurrido grandes catástrofes una provocadas por la misma dinámica del planeta y otras por eventos extraterrestres.



Figura 12. Capas internas y externas de la Tierra. La biósfera incluye parte de la Lito, Hidro y Atmo-sferas. Tomada de <https://www.istockphoto.com/vector/structure-of-earth-and-sky-geography-infographic-concept-3d-illustration-gm1974530169-558635670>

En las primeras se incluyen grandes y prolongadas erupciones volcánicas, cambios drásticos de temperatura, provocando sequías y heladas por varios cientos o miles de años, variaciones de velocidades de expansión de piso oceánico o desplazamientos de las placas tectónicas, mientras que de los fenómenos externos ha habido colisiones de asteroides, cometas, polvo cósmico o grandes radiaciones de estrellas, cambios orbitales y variaciones de la inclinación del eje de rotación de la Tierra.

En los últimos 542 Ma, han ocurrido más de 18 extensiones masivas de la biosfera, en 9 se han extinguido más del 40% de las especies y coinciden con los límites: 3 en el Camb y 1 en el límite Camb/Ord 1 en Ord/Sil, en Dv/Cab, 2 en Per/Tr, 1 en Tr/Jr y 1 en K/P (Figura 13). De seguir contaminando al planeta en forma desmedida podríamos generar otra gran extensión de especies y la especie *homo sapiens* se podría también vulnerable.

Los cambios climáticos podrían producir extinciones masivas de especies, porque en muchas ocasiones hay un

incremento o decremento de ciertos gases o elementos, como el O_2 , CO_2 , H_2O , CH_4 , H_2S , NH_3 , H_2O , etc. Y a pesar de que su volumen es insignificante, con respecto al N y O, con casi el 98.5 %, y el CO_2 menos de 0.04 %, pueden incrementar la temperatura de todo el globo terráqueo. Aunque la misma geodinámica de la Tierra siempre recicla estos compuestos, ya que va obteniendo, poco a poco, su propio equilibrio. (Figura 14)

En el 2018 México producía sólo el 1.28 % de CO_2 y el 98.72 lo producían los otros países del mundo. Destacan los países como EUA, China, India, Rusia, Japón y la Unión Europea que producen más de 70 %. En el 2021 México producía sólo el 3.3 % de CO_2 y el 96.7 lo producían los países anteriormente mencionados.

En 2008 México ocupó el lugar 32 con 0.52 Tm de CO_2 de emisiones *per cápita*. Mientras que en el 2021 México ocupó el lugar 109 de los 206 países de la ONU en emisiones *per cápita* en la industria eléctrica. Eso significa que cada habitante producía en promedio 0.84 Toneladas de CO_2 . (Figura 15)

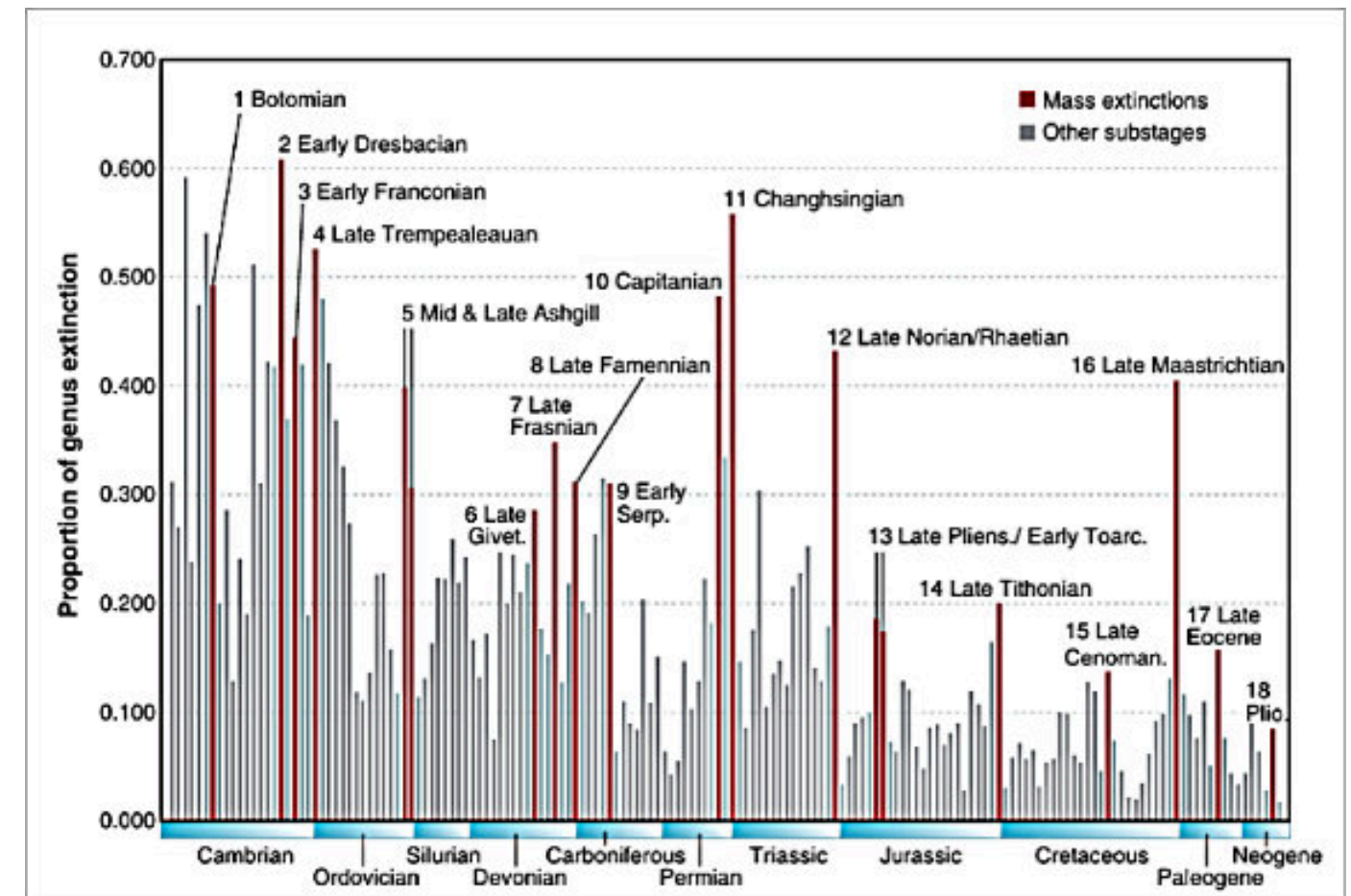
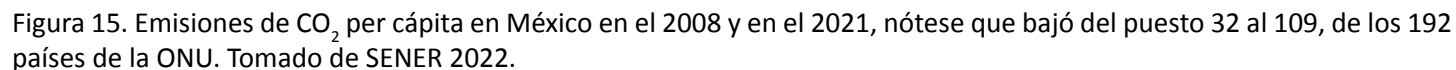
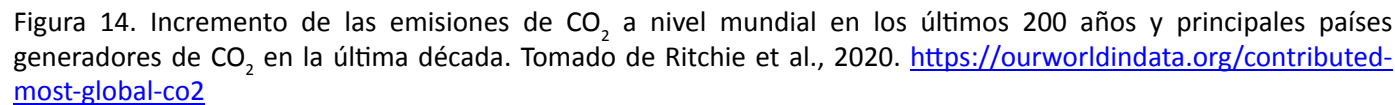


Figura 13. Proporción de extinción de especies para 165 subestadios utilizando el método de Sepkoski de asignación proporcional de puntos de inicio y fin mal resueltos de rangos estratigráficos. Los 18 intervalos de extinción masiva comunes a todos los protocolos de clasificación están etiquetados. Tenga en cuenta que algunos de los otros intervalos de subestadios tienen proporciones de extinción tan grandes como los intervalos de extinción masiva, pero generalmente son intervalos más largos y tienen tasas generales de extinción más bajas. La disminución secular general en la proporción de extinción es evidente, como lo es la fluctuación de proporciones generales más altas en el Cámbrico y el Ordovícico Inferior, proporciones generales más bajas para el Ordovícico medio hasta proporciones más bajas después del Triásico. Tomado de Bambach 2006.



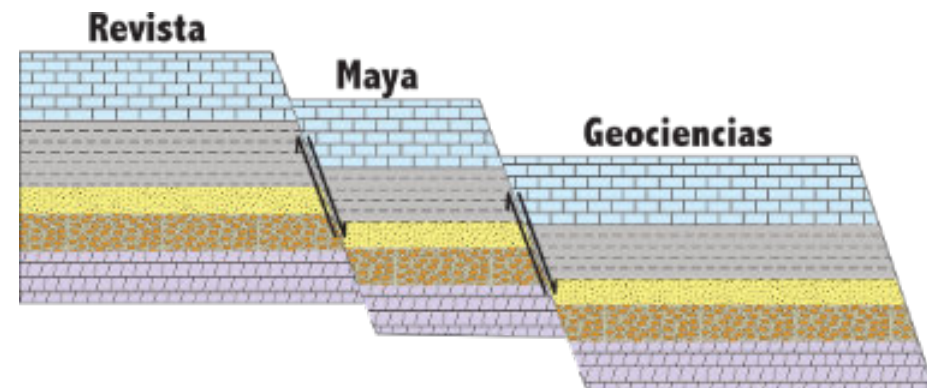
A diferencia de la Mo fósil cuyo ambiente de depósito fue acuoso, la biomasa casi en su totalidad se produce en ambientes secos y continentales, en áreas cultivables que

Tissot, B. P., & Welte, D. H. (2013). *Petroleum formation and occurrence*. Springer Science & Business Media.



Demetrio Marcos Santamaría Orozco es mexicano, Ingeniero Geólogo por la Facultad de Ingeniería de la UNAM, Maestro en Ingeniería por la DEPI de la UNAM y Doctor en Ciencias Naturales por la Universidad Técnica de Aquisgrán (RWTH Aachen), Alemania. Tiene 40 años de experiencia, 3 en la iniciativa privada, 31 en el IMP, y 6 en la UNAM. Fue investigador científico en el IMP e investigador invitado por la Universidad de Trier, y por el KFA de Jülich, ambos en Alemania. Catedrático de Posgrado en las Facultades de Ingeniería y Ciencias Políticas de la UNAM, IMP, ESIA del IPN y la ESI de la UA de Coahuila. Ha escrito 4 libros, 4 capítulos de libro, 25 artículos científicos y de divulgación, ha impartido más de 50 conferencias. Fue presidente nacional de la SGM, presidente de la AMGP-CDMX, director en México de la ALAGO, director del Comité de Ciencias de la Tierra de UMAI, presidente de la Comisión de Especialidad en Ingeniería Geológica de la AIM. Ha sido árbitro y editor de varias revistas científicas nacionales e internacionales. Fue miembro del SIN por más de 6 años y es Académico Titular de la AIM desde 2008. En el 2023 recibió los premios nacionales de la SGM y de la AMGP.

El autor agradece el estupendo apoyo por parte de los editores de la Revista Maya de Geociencias, así como sus atinados comentarios y sugerencias. En especial al Dr. Claudio Bartolini y al M. en C. Luis Valencia.



The Field

Jon Blickwede

Geological Consultant

www.teyrageo.com

I think it's ironic, in a sad sort of way, that one of the main aspects of the vocation of geoscience that attracted most of us to it in the first place was the opportunity to spend time outdoors in the field: traipsing around the countryside, contemplating and analyzing outcrops from afar and up close, measuring and describing sections, mapping, collecting samples, deploying geophysical instruments, etc.— and at the same time reveling in beautiful landscapes, daytime “sky-scapes,” the wondrous nighttime canopy of a gazillion stars, and experiencing the ineffable, profound peace of the precious part of God's creation far from the city. Of course, being in the field at times also entails discomfort, frustrations, bug bites and perhaps other negative things. After all, it's a part of life. But as geoscientists we greatly treasure our field experiences.

I say “ironic” and “sad” because so few geoscientists, in particular in the modern-day oil & gas industry, ever get out to the field anymore, at least for their companies' business. And if they do, it's typically not to perform traditional field work but rather to participate in brief field seminars. Why did this happen? I'll suggest a couple of reasons. Time in the field has long been perceived by many non-geoscientist managers (and unfortunately, a few geoscientist managers too) as being frivolous and unproductive, contrived only for fun— i.e. “boondoggles.” Moreover, the geologist who's doing field work is out of the office, out of sight of management, and therefore more difficult to monitor and control. While the latter may be true, the value of getting out in the field to study outcrops relevant to subsurface work in the same basin, or an analogous basin, is unassailable. And what's wrong if a part of one's job happens to be fun?!

If the main focus of the science of geology is the Earth, it logically follows that the primary approach to studying the Earth would be to observe it directly and gather data to analyze and interpret. And the only way to directly observe mesoscale features of the Earth is by getting out into the field.

It's rare, but in recent years there still have been some larger oil & gas firms that have allowed, and even encouraged field work. One of the things I've admired about Mexico's state oil company Pemex is that they required, up until the turn of the century, that each new-hire geologist spend the first couple of years of his/her career doing field mapping as part of a team. These *brigadas* were typically led by senior-level geologists in Pemex, who used the program to pass on their years of accumulated knowledge to the next generation. In addition, through shared adventures in the *brigadas*, a strong sense of camaraderie was created which in many cases carried on through entire careers in the company.



My MSc project field area, Sierra de San Julián, northern Zacatecas state, México, 1980.