

PALEONTOLOGÍA EN LA ECONOMÍA NACIONAL (FORO 4)

CONTRIBUCIÓN DE LA PALINOLOGÍA A LA EXPLORACIÓN DE HIDROCARBUROS: SOBRE EL CASO DEL YACIMIENTO VACA MUERTA EN ARGENTINA

Mercedes DI PASQUO¹ & Mirta QUATTROCCHIO²

INTRODUCCIÓN

El objetivo es analizar de manera resumida diferentes aspectos que contribuyen a la exploración de hidrocarburos (petróleo y gas, productos no renovables del subsuelo) desde la Palinología. En esta contribución se desarrolla el caso del yacimiento Vaca Muerta en Argentina, pues en estos últimos años ha recobrado una gran repercusión por constituir una parte esencial para el desarrollo de nuestra vida diaria (<http://www.shaleenargentina.com.ar/vaca-muerta>). Mucho se ha escrito sobre aspectos económicos de inversiones de alto riesgo vinculadas con la extracción de hidrocarburos, dado que dichas acumulaciones comerciales a menudo sólo se encuentran luego de varios y costosos intentos fallidos, y también sobre los rasgos geoquímicos y tratamientos ingenieriles que atañen a la fase de explotación y su utilización en los diferentes procesos de la sociedad (Uliana et al., 1999; Anadón et al., 2015; Spacapan et al., 2018; http://www.iapg.org.ar/web_iapg/publicaciones/revista-petrotecnia/blog). En cambio, los estudios geológicos y paleontológicos básicos sobre los cuales se sustenta todo lo anterior fueron encarados desde inicios del 1900, como se relata en el libro *Centenario del Petróleo Argentino* (Salas, 2007), la historia de los descubrimientos de petróleo y gas en Plaza Huincul en Neuquén. Basado en informes de Whidhausen, posteriormente confirmados por el geólogo alemán Juan Keidel (1877-1954) contratado por la División Minas, Geología e Hidrología, sostuvo: «En el Neuquén, según el resultado de los estudios realizados, el ala oriental del área oriental del geosinclinal andino, que corre desde el sur a Mendoza hasta el río Limay, reúne perfectas condiciones geológicas para encerrar yacimientos petrolíferos, revelados en la superficie por algunas manifestaciones características: manantiales de petróleo, depósitos asfálticos, etc.». El nombre de Vaca muerta por su parte, se debe al geólogo estadounidense Charles Edwin Weaver, quien describió en las laderas de la Sierra de la Vaca Muerta (Neuquén), la presencia de una nueva roca generadora, en su recorrida por

Neuquén y Mendoza contratado por la Standard Oil de California prospectando el prometedor territorio (Weaver, 1931). Los primeros estudios palinológicos fueron iniciados en las décadas del 60' y 70' (e.g. Volkheimer, 1968; Volkheimer & Quattrocchio, 1975) y desde entonces se llevaron a cabo en toda la sucesión sedimentaria del Meso-Cenozoico en la Cuenca Neuquina (ver Quattrocchio et al., 2007; Volkheimer et al., 2011; Martínez & Olivera, 2016). Sus aportes fueron relevantes para el descubrimiento de nuevos yacimientos y su caracterización, al menos preliminar, sobre el tipo de reservorios y la materia orgánica que los produjo (e.g. Veiga & Orchuela, 1988; Pazos, 2016).

METODOLOGÍAS Y MUESTREO

El pequeño tamaño de los palinomorfos (microfósiles de materia orgánica momificada, Paleopalínología) favorece su preservación en sedimentos finos (pelitas y relacionados a dicho tamaño de grano) preferentemente de color grisáceo y castaño, y en una gran variedad de ambientes sedimentarios y permite encontrarlos a lo largo de la columna estratigráfica desde el Precámbrico hasta el presente (Palinoestratigrafía). Para obtenerlos de las rocas se aplican metodologías de acuerdo con los siguientes pasos: 1 – molienda (hasta tamaños no menores de 2-3 mm, o sin moler), 2- ataque químico con HCl y HF para desintegrar carbonatos y silicatos realizando lavados hasta neutralidad para el cambio de ácidos, 3- Obtención del residuo a través de métodos como filtrado con malla de 10 micrones (o mayor diámetro según el propósito), o por concentrado con soluciones densas (e.g. ClZn), 4- Montado de preparados palinológicos con diferentes productos, el más simple y económico es la gelatina glicérica (Traverse, 2007). Su análisis microscópico permite obtener información sobre la composición, edad (palinomorfos) y tipo de querógeno (palinofacies), y el grado de maduración térmica, el cual se cuantifica usando escalas de color (Fig. 1) que indican el potencial de formación o generación de hidrocarburos (bitumen) para el nivel

¹ CICYTTP-CONICET-ER-UADER, Dr. Matteri y España SN, Diamante, E3105BWA, Entre Ríos, Argentina.

² Instituto Geológico del Sur-CONICET y Universidad Nacional del Sur, Alem 1253 cuerpo B' 1º Piso, B8000ICN, Bahía Blanca, Bs As, Argentina
E-mail: medipa@cicytpp.org.ar

estudiado (Fig. 2). De esta forma se contribuye con información sobre una potencial roca madre y el tipo de hidrocarburo que produjo, líquido o gas (Batten, 1996). Por ejemplo, el querógeno tipo I o II compuesto por amorfógeno y/o firógeno, caracterizado por palinomorfos tipo fitoplancton, ricos en lípidos y cadenas alifáticas con alto contenido en hidrógeno y con grado de maduración TAS 3-5 (=TAI 2 y +3), es buen productor de petróleo e indica que alcanzó una temperatura entre 80 y 170° (catagénesis, Fig. 2, Villar y Archangelsky, 1980; Batten, 1996).

La formación geológica Vaca Muerta se define como un yacimiento no convencional tipo «shale gas», pues se trata de la propia roca generadora casi impermeable, con un alto contenido de materia orgánica en arcillas muy poco porosas, denominada vulgarmente «shale». La explotación de este tipo de depósitos donde se han originado hidrocarburos tras un extenso y largo proceso geológico (Fig. 2), requiere la aplicación de técnicas conocidas como fracturación hidráulica (también llamada *fracking*). Esta técnica es utilizada junto con otras en la explotación de yacimientos tradicionales o convencionales, cuando los hidrocarburos se alojaron en cuerpos arenosos u otro tipo de rocas porosas o fracturadas (roca trampa) a partir de su migración desde su roca generadora.



Figura 1 Ejemplo de valores de maduración térmica de la materia orgánica en escala TAI (véase en Batten, 1996) con valores entre 1 (incolores) a 5 (negro), con base en palinomorfos procedentes de la Formación Sappington del Famenniano tardío (Devónico), suroeste de Montana. Esta formación es correlacionada con la Formación Bakken, roca generadora de cuencas productoras de hidrocarburos presentes en el subsuelo del norte de Montana y áreas vecinas en USA y Canadá (Grader et al., 2016; di Pasquo et al., 2017).

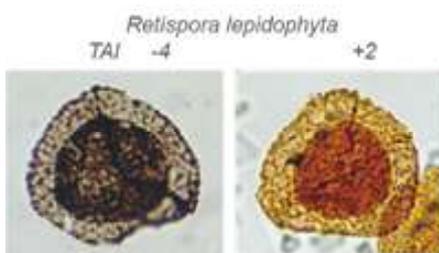


Figura 2 Correlación de maduración térmica de la materia orgánica con otros indicadores (tomado de Batten, 1996).

Es importante destacar que para detener la migración de dichos fluidos se requiere la presencia de una roca sello por arriba, y de allí la importancia de realizar estudios de las sucesiones de superficie para conocer mejor el apilamiento de unidades en subsuelo y la ubicación de posibles yacimientos de petróleo (líquido de distintas densidades) y gas, el cual por ser más liviano se ubica en general por arriba de la fase líquida (véase Veiga & Orchuela, 1988; Legarreta et al., 2000). El fracking consiste en la inyección a presión de una mezcla de agua, arena y aditivos químicos para generar microfisuras más angostas que el ancho de un pelo pero suficientemente efectivas para que el fluido migre de una roca generadora no porosa. Para ello, con frecuencia es necesario contar en boca de pozo (o sea en el lugar de extracción), con palinólogos, geólogos y geofísicos quienes analizan los sedimentos que se extraen de las perforaciones, en general conocidos como «cutting» o roca molida, de manera de poder identificar el momento en que se alcanza dicha unidad estratigráfica estimativamente alrededor de los 3000 metros de profundidad, y detener la perforación por su alto costo (Anadón et al., 2015; Gonzales et al., 2016; Pazos, 2016; Spacapan et al., 2018). Esto implica contar con especialistas entrenados para reconocer las características específicas de la unidad, como su litología, palinomorfos (ver más adelante), y otros rasgos físico-químicos y geofísicos, los cuales pueden obtenerse tanto de superficie como de subsuelo preferentemente de testigos de corona para evitar contaminaciones como en el caso del cutting (Villar & Archangelsky, 1980; McGregor, 1996; Batten, 1996).

BREVE RESEÑA HISTÓRICA DE ESTUDIOS PALINOLÓGICOS EN VACA MUERTA

La primera etapa de estudios en la cuenca Neuquina (Jurásico-Neógeno) como se menciona arriba, estuvo a cargo principalmente de geólogos extranjeros contratados por empresas petroleras, en la cual se identificaron y caracterizaron unidades estratigráficas como la Formación Vaca Muerta. Los estudios paleontológicos y especialmente palinológicos sobre el Jurásico se iniciaron en la década del 60', y tuvieron un intervalo de alta producción de trabajos entre las décadas del 80' y 2000' hasta la actualidad como veremos a continuación. Su contenido palinológico caracterizado por especies terrestres y marinas fue llevado a cabo en varias contribuciones (Volkheimer & Quattrocchio, 1975, 1977; Quattrocchio, 1980; Quattrocchio & Volkheimer, 1990; Quattrocchio & Sarjeant, 1992, consultar estas citas en Martínez & Olivera, 2016). Numerosos estudios de unidades jurásicas presentan actualizaciones taxonómicas, definición de biozonas ajustando sus edades y sus correlaciones con otras unidades de la cuenca e interpretaciones paleoambientales (e.g. Quattrocchio

et al., 2007; Volkheimer et al., 2011; Martínez & Olivera, 2016). Entre el Titoniano temprano y medio, la composición palinoflorística de la parte inferior de la Formación Vaca Muerta se caracteriza por el predominio de acritarcas y prasinofitas sobre dinoflagelados. Su parte media en cambio, muestra una proporción similar entre ambos grupos fitoplanctónicos marinos con dinoflagelados como *Escharisphaeridia pocockii*, *Hystricosphaerina neuquina* y especies de *Acanthaulax* conocidos en asociaciones árticas y boreales, mientras que *Apteodinium reticulatum* y *Jansonia* spp. (Lámina 1), son característicos de provincias transicionales (Canadiense). La Formación Picún Leufú suprayacente muestra una mayor proporción y diversidad en dinoflagelados (*Aptea notialis*, *Diacanthum argentinum*, *Paraevansia mammillata*, *Pilosidinium cactosum* (Quattrocchio & Sarjeant, 1992). Por ejemplo, la Zona de *D. culmula* var. *curtospina* del Titoniano tardío se define por su primera aparición hasta la primera aparición de *Aptea notialis* (Fig. 4,

Lám. 1). En la localidad de Picún Leufú, la parte inferior del Titoniano tardío corresponde probablemente a la Zona de amonites *Corongoceras alternans* mientras que la Zona de *A. notialis* (Titoniano más tardío) se basa en el rango total de la especie homónima y se correlaciona con la Zona de amonites *S. koeneni* (Fig. 4). Damborenea (1993, véase en Quattrocchio et al., 2007), mencionó para la misma área, la ocurrencia de especies de bivalvos típicamente tethyanos en asociación con especies de altas latitudes y lo atribuyó a una posición intermedia de la Cuenca Neuquina (latitud media) en ausencia de barreras significativas. Por lo tanto, el predominio de dinoflagelados proximados y corados gonyaulacoides y ausencia (o baja frecuencia) de elementos continentales y la acumulación de materia orgánica tipo amorfa, permite definir un depocentro en mar abierto con fondo anóxico, rodeado por un cinturón nerítico sometido a sedimentación carbonática (F. Quintuco) y terrígena (F. Picún Leufú) (Legarreta et al., 2000; Volkheimer et al., 2011).

My	SYSTEM	SERIES	STAGES	Substages	AMMONITES		DINOFLAGELLATES		FIRST APPEARANCE	
					ZONE	Sub-zone	POLLEN / SPORES	DINOFLAGELLATES		
135	R	TITHONIAN	U	M	<i>Substeuerocheras koeneni</i> <i>Corongoceras alternans</i> <i>Windhausenicerias internispinosum</i> <i>Aulacosphinctes proximus</i> <i>Pseudolissoceras zitteli</i> <i>Virgatosphinctes mendozanus</i>	<i>Aptea notialis</i> <i>Dichadogodonyaulax</i> <i>Milioudodinium culmula</i> <i>nuciforme</i>	b	<i>Microachryoides antarcticus</i>	<i>Acanthaulax downiei</i> <i>Aptea notialis</i> <i>D. culmula</i> var. <i>curtospina</i> <i>Diacanthum</i> cf. <i>holisteri</i>	
140										R

PALAEO TEMPERATURE °C	Diagenetic and Metamorphic Grade	COAL CLASSIFICATION		VITRINITE REFLECTANCE R ₀	THERMAL ALTERATION SCALE (Polymorph colours)	ILLITE CRYSTALLINITY	DEGREE OF MATURATION	HYDROCARBON GENERATION / RESERVOIRS
		German	ASTM					
30-65°	I II III IV	Torf	peat	0.2	1/2	yellow	immature	dry gas
80°		Weich- Braunkohle	sub-bituminous	0.3	2	light brownish yellow-orange	mature	medium to light oil
		Mitt- Braunkohle	sub-bituminous	0.4	3	yellow-orange		
		Glanz- Braunkohle	sub-bituminous	0.5	3 1/2	orange		
120-170°		Flamm- Steinkohle	high volatile	0.6	4	light-medium brown	transition	condensates
		Gastamm- Steinkohle	high volatile	0.7	4 1/2	medium brown		
170-180°		Gas- Steinkohle	medium volatile	0.8	5	dark brown	metamorphosed	dry gas with H ₂ S or CO ₂ , bitumen plugging of porosity, poor porosity, traces of dry gas, CO ₂
		Fett- Ess- Mager- Anthrazit	low volatile	0.9	5 1/2	very dark brown-black		
200°		Anthrazit	semi-anthracite	1.0	6	black (opaque)		
		Anthrazit	anthracite	1.2	6 1/2	black (opaque)		
		Anthrazit	anthracite	1.35	7	black (opaque)		
		Anthrazit	anthracite	2	8	black (opaque)		
		Anthrazit	anthracite	3	9	black (opaque)		
		Anthrazit	anthracite	4	10	black (opaque)		

Figura 4 Correlación de biozonas de amonites y palinomorfos del Titoniano comprendidos en las formaciones Vaca Muerta y Picún Leufú en Cuenca Neuquina (tomado de Quattrocchio et al., 2007)

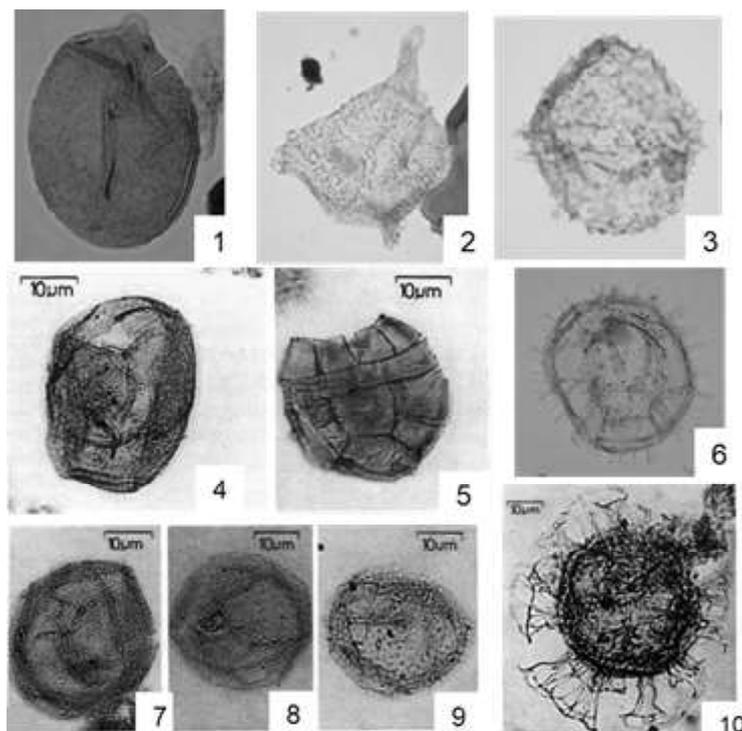


Lámina 1 En 1: *Paraevansia mammillata*. En 2: *Aptea notialis*. En 3: *Lithodinia jurassica*. En 4: *Escharisphaeridia pocockii*. En 5: *Jansonia psilata*. En 6: *Dichadogonyaulax culmula*. En 7: *Apteodinium bucculiatum*. En 8: *Acanthaulax downiei*. En 9: *Acanthaulax aff. paliuros*. En 10: *Hystricosphaerina neuquina* (tomado de Quattrocchio et al., 1996, 2007; Martínez & Olivera, 2016).

DISCUSIÓN SOBRE SU IMPORTANCIA EN LA EXPLORACIÓN DE HIDROCARBUROS

La Formación Vaca Muerta tiene una amplia extensión en la cuenca Neuquina abarcando las provincias de Neuquén, Río Negro, La Pampa y Mendoza, Argentina (Yacimiento petrolífero Vaca Muerta - Wikipedia, la enciclopedia libre, Anadón et al., 2015) y contiene hidrocarburos producto de la acumulación de abundante materia orgánica derivada principalmente del fito-zooplankton en un fondo anóxico-disóxico. Su soterramiento permitió preservar dichos sedimentos organógenos, convertidos en roca generadora de hidrocarburos a partir de los procesos de diagénesis arriba mencionados. Su importancia económica se debe a su extensión y a su emplazamiento a una profundidad de explotación accesible (entre 2500 y 3000 m). Desde 2010 a la fecha, y especialmente durante los últimos años, la Argentina está ubicada en el segundo puesto de la lista de países poseedores de los mayores recursos recuperables de gas almacenado en las rocas generadoras. En la Formación Vaca Muerta ya se han perforado alrededor de 500 pozos. La experiencia adquirida en la etapa exploratoria mencionada permite dejarla atrás para ingresar de lleno en proyectos piloto, con importantes inversiones. Buenos resultados alcanzados con este

tipo de yacimiento no convencional aportan un significativo porcentaje al total de la producción del país (Anadón et al., 2015; Pazos, 2016; Spacapan et al., 2018; <http://www.shaleenargentina.com.ar/vaca-muerta>).

AGRADECIMIENTOS

A los geólogos y paleontólogos, por su perseverancia en el desarrollo de estudios científicos y técnicos, y a los organismos de ciencia y empresas por su apoyo en diferentes etapas del conocimiento pues en conjunto contribuyen a las necesidades de la sociedad.

REFERENCIAS

- Anadón E.L., Casalotti V., Masarik G. & Halperin F. (2015). El abece de los Hidrocarburos en Reservorios No Convencionales. Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, Publicación de Divulgación, p. 1-20. 4a ed. www.iapg.org.ar
- Batten D.J. (1996). Chapter 26.A. Palynofacies and paleoenvironmental interpretation. B. Palynofacies and petroleum potential. En: Palynology: principles and applications, Jansonius, J., McGregor, D.C. (eds). American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation, v. 3, p. 1011-1084. Utah

- Di Pasquo M.M., Grader G.W., Warren A., Rice B., Isaacson P. & Doughty P.T. (2017). Palynological delineation of the Devonian - Carboniferous boundary, west-central Montana. *Palynology*, Special Issue in honor of Gordon Wood, v. 41, p. 189-220.
- González G., Desjardins P., Vallejo M.D., González Tomassini F., Kietzmann D., Gómez Rivarola L., Marcha D. & Domínguez R.F. (2016). Transecta regional de la formación Vaca Muerta: integración de sísmica, registros de pozos, coronas y afloramientos. Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, 252 p.
- Grader G.W., Isaacson P., Doughty P.T., Pope M.C. & Desantis M.K. (2016). Idaho lost river shelf to Montana Craton: North American Late Devonian stratigraphy, surfaces, and intrashelf basin. *New Advances in Devonian Carbonates: Outcrop Analogs, Reservoirs, and Chronostratigraphy*, SEPM Special Publication v. 107, p. 347-379.
- Legarreta L., Laffitte G.A. & Villar H.J. (2000). Source rocks, thermal evolution and distribution of different hydrocarbon types in the Neuquén basin, Argentina. En: Trindade, L.A.F., Macedo, A.C. & Barbanti, S.M. (ed.), *Proceedings VII Latinamerican Congress on Organic Geochemistry*, Foz do Iguaçu, p. 47-49.
- Martínez M. & Olivera D. (2016). Jurassic organic-walled marine microplankton from the Neuquén basin. Distribution, biostratigraphy and paleobiogeography: A review. *Publicación Electrónica*, v. 16(2), p. 106-128.
- McGregor D.C. (1996). Chapter 28.B. Palynomorphs in petroleum and formation water: a review. En: *Palynology: principles and applications*, Jansonius, J., McGregor, D.C. (eds). American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation, v. 3, p. 1115-1122.
- Pazos P. (2016). Vaca Muerta y algo más Reservoirs no convencionales de petróleo y gas. <http://cienciahoy.org.ar/2016/01/vaca-muerta-y-algo-mas-reservorios-no-convencionales-de-petroleo-y-gas/>
- Quattrocchio M.E. & Sarjeant W.A.S. (1992). Dinoflagellate cysts and acritarchs from the Middle and Upper Jurassic of the Neuquén Basin, Argentina. *Revista Española de Micropaleontología*, v. 24, p. 67-118.
- Quattrocchio M., Martínez M. & Volkheimer W. (2007). Las floras jurásicas de la Argentina. *Ameghiniana 50º aniversario*, p. 87-100.
- Quattrocchio M.E., Sarjeant W.A.S. & Volkheimer W. (1996). Marine and terrestrial Jurassic microfloras of Neuquén Basin (Argentina): Palynological Zonation. En: A.C. Riccardi (ed.), *Advances in Jurassic research*. Transtec Publications, Switzerland. *GeoResearch Forum*, v. 1-2, p. 167-178.
- Salas H. (2007). *Centenario del Petróleo Argentino*, Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, www.iapg.org.ar.
- Spacapan J.B., Palma J.O., Rocha E., Leanza H.A., D'Odorico A., Rojas Vera E.A., Manceda R., Galland O., Medialdea A. & Cattaneo D.M. (2018). Maduración de las Formaciones Vaca Muerta y Agrio ocasionado por el emplazamiento de un complejo intrusivo magmático en el sector sur mendocino de la Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, v. 75, p. 200-210.
- Traverse A. (2007). *Paleopalynology*. Unwin Hyman Ltd., 600 pp., London.
- Uliana M., Legarreta L., Laffitte G. & Villar H.J. (1999). Estratigrafía y geoquímica de las facies generadoras de hidrocarburos en las cuencas prolíferas de Argentina. IVº Congreso Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas I: 1 -61, Mar del Plata.
- Veiga R.D. & Orchuela I.A. (1988). Técnicas de perfilaje para identificar niveles generadores de hidrocarburos en la Formación Vaca Muerta. *Boletín de Informaciones Petroleras*, Tercera Epoca, v. 13, p. 76-94.
- Villar H. & Archangelsky S. (1980). Recientes enfoques de la geoquímica orgánica y la palinología aplicados a estudios sobre génesis y exploración de petróleo y carbón. *Bol. Asoc. Lat. Paleobot. Palinol.*, v.7, p. 1-21, Buenos Aires.
- Volkheimer W., Quattrocchio M., Martínez M., Prámparo M., Scafati L. & Melendi D. (2011). Palinobiotas Fósiles. XVIII Congreso Geológico Argentino, Neuquén, Relatorio, p. 579-590.
- Weaver C.E. (1931). Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of West Central Argentina. *Memoir of the University of Washington*, v. 1, p. 1-469.

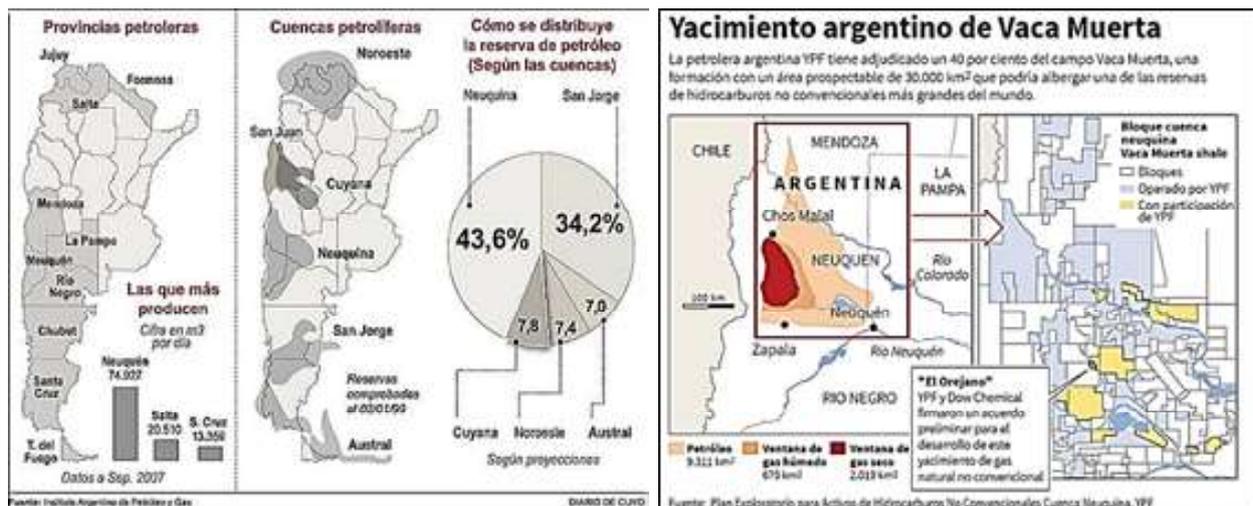


Figura 5 Distribución provincial de la cuencas sedimentarias y su producción de hidrocarburos (tomado del Instituto Argentino de Petróleo y Gas, http://www.iapg.org.ar/web_iapg/publicaciones/revista-petrotecnica/blog)