



Variação na mineralogia magnética ao longo dos eventos de anoxia oceânica do Cretáceo: Um exemplo do OAE1 na Bacia Umbria-Marche, Itália.

Vanessa Stuque, IAG/USP; Jairo F. Savian, IAG/USP e CCEAH/UNISANTOS; Ricardo I.F. Trindade, IAG/USP; Liliane Janikian, IAG/USP e CCEAH/UNISANTOS, Luigi Jovane, IO/USP; Renato P. Almeida, IGC/USP; Rodolfo Coccioni, DSTVA/UU; Fabrizio Frontalini, DSTVA/UU; Marianna Sidere, DSTVA/UU; Milene F. Figueiredo, PETROBRAS; e Leonardo R. Tedeschi, PETROBRAS.

Copyright 2013, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

We studied the variations on the magnetic mineralogy during the upper Barremian to lower Aptian at Maiolica and Marne a Fucoidi formations, sampled at the Poggio le Guaine Core (Core PLG), Italy. In the Aptian age, important global climatic events occur (e.g., Ocean anoxic Events-OAE) that affect the input of detrital magnetic minerals and the local redox environment in the deep sea. The resulting magnetic mineralogy is controlled by these two factors and can be used as a proxy for the environmental changes throughout this period. Magnetic susceptibility and artificial remanences (ARM and IRM) were measured in 391 samples. Thermomagnetic curves and acquisition of isothermal remanent magnetization were measured in a selected group of samples. Our data clearly shows strong variations at the onset of the OAEs at the lower Aptian boundary, when an increase in concentration parameters precedes the Selli and Noir levels. The association between magnetic mineralogy and changes in redox condition is discussed.

Introdução

O Cretáceo é caracterizado por variações importantes nos diferentes envelopes terrestres, desde o Núcleo até a hidrosfera e a atmosfera (Skelton *et al.*, 2003; Föllmi e Gainon, 2008; Biggin *et al.*, 2012; Föllmi, 2012). Esse período é caracterizado por intervalos de altas temperaturas médias (*ultra-greenhouse*). Os períodos *ultra-greenhouse* coincidem com eventos de anoxia oceânica (OAEs) (Schlanger and Jenkyns, 1976) marcados no registro sedimentar por níveis ricos em matéria orgânica (*black shales*) que são encontrados em diversas partes do globo (Emeis e Weissert, 2009). Alguns desses níveis têm extensão global, como os níveis Selli (OAE1) e Bonarelli (OAE2) (Schlanger e Jenkyns, 1976; Arthur *et al.*, 1990) e uma conexão destes com a formação de grandes províncias magmáticas (*large igneous provinces* – LIPs), em particular os derrames basálticos de Ontong-Java (para o OAE1) e do Caribe (OAE2) tem sido proposta por diversos autores (Tejada *et al.*, 2009; e suas referências).

O magnetismo ambiental utiliza técnicas magnéticas para investigar a formação, transporte, deposição, e alterações pós-deposicionais de rochas e minerais

magnéticos (Liu *et al.*, 2012). Uma dos parâmetros mais empregados em investigações de magnetismo ambiental é a suscetibilidade magnética, que é uma medida quantitativa da capacidade de magnetização dos materiais na presença de um campo indutor (e.g., Liu *et al.*, 2012). Quando uma amostra é submetida a um campo magnético (H), a mesma adquire uma magnetização induzida (M) que é proporcional e paralela ao campo aplicado. Com isso temos a constante de proporcionalidade k.

$$k = M/H \quad (1)$$

No sistema internacional (SI), tanto M como H são medidos em A/m, sendo k adimensional. A suscetibilidade magnética por unidade de massa é simbolizada por χ_m , que é a razão entre a constante de proporcionalidade k e a densidade (ρ) do material.

$$\chi_m = k/\rho \quad (2)$$

onde a unidade de χ_m é m³/kg.

As curvas termomagnéticas mostram a variação da suscetibilidade magnética (χ_m) em função da temperatura (T). Para minerais paramagnéticos a variação de χ_m vs. T obedece a uma função do tipo c/T (onde c é a constante de Curie-Weiss). Minerais ferromagnéticos e antiferromagnéticos mostram temperaturas de transição, respectivamente temperatura de Curie (T_c) e temperatura de Néel (T_N) (e.g., Dunlop e Özdemir, 1997).

Além disso, podemos extrair informações adicionais sobre a mineralogia magnética utilizando magnetizações artificiais, como a magnetização remanente isotérmica (MRI), que é produzida aplicando pulsos de campo magnético nas amostras (e.g., Robertson *et al.*, 1994). Esses pulsos são aumentados gradualmente até que a amostra alcance a magnetização de saturação (M_s). Essa análise permite investigar a coercividade dos minerais magnéticos que constituem a rocha (e.g., Dunlop e Özdemir, 1997).

Desse modo, o estudo da mineralogia magnética é fundamental em estudos paleomagnéticos para a determinação do portador magnético existente na rocha. Este trabalho servirá como base para estudos paleomagnéticos futuros que irão determinar a magnetoestratigrafia do PLG Core e também como base para o estudo da origem dos sedimentos na Bacia de Umbria-Marche durante o Barremiano-Aptiano.

Arcabouço Geológico

O testemunho *Poggio le Guaine Core* foi perfurado para fornecer informações em alta resolução para o Cretáceo

Superior, como modelo de idade e uma curva de referência de paleointensidade magnética para o intervalo Aptiano-Albiano onde ocorre o Superchron Normal do Cretáceo (Coccioni *et al.*, 2012). Além disso, o PLG Core irá fornecer informações importantes para a melhor compreensão das relações causais entre os eventos geológicos biogeoquímicos, oceanográficos e climáticos e as suas consequências para a biosfera (Coccioni *et al.*, 2012). O testemunho foi coletado na seção de *Poggio le Guaine*, exposta ao longo da Bacia de Umbria-Marche (UMB) ao norte dos Apeninos, Itália central (Figura 1), onde se encontra uma sucessão aptiana-albiana, contínua, completa, e bem preservada (Coccioni *et al.*, 2012).

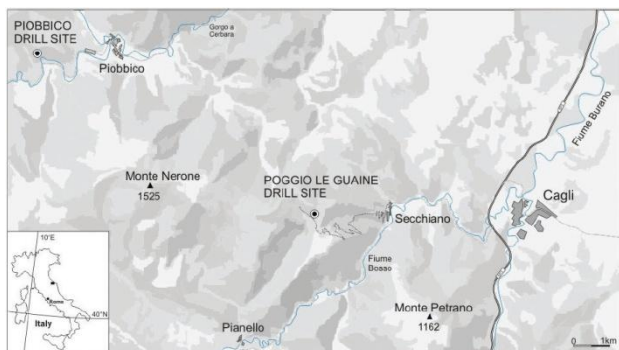


Figura 1: Localização do PLG Core na Bacia de Umbria-Marche, Itália Central (Coccioni *et al.*, 2012).

Metodologia

As amostras foram coletadas ao longo do testemunho com resolução média de 3 cm. Cada amostra possui dimensão de cerca 8 cm³. Foi realizada a medida da suscetibilidade magnética em um total de 391 amostras entre as profundidades 85.07 e 98.69 m. Além disso, foram realizadas curvas de aquisição da Magnetização Remanente Isotérmica (MRI) para 8 amostras representativas distribuídas ao longo do testemunho. Curvas termomagnéticas para 4 amostras também foram realizadas.

Os dados de suscetibilidade magnética foram obtidos através do equipamento KappaBridge MFK1-FA em três frequências diferentes 976 Hz, 3904 Hz e 15616 Hz com um campo magnético constante de 200 A/m (Dearing *et al.*, 1996). O protocolo experimental da aquisição das curvas de aquisição de MRI consiste em medir a magnetização após cada etapa da indução magnética até a saturação da amostra (Magnetização Remanente Isotérmica de Saturação - MRIS). Foram realizados 45 passos aplicando-se campos sucessivamente crescentes (de 0 a 100 mT, com incremento de 5 mT; de 100 a 300, com incremento de 20 mT; e de 300 a 1000 mT, com incremento de 50 mT) no *2G-Enterprises Pulse Magnetizer*, e a medida de magnetização remanente foi realizada no magnetômetro SQUID da *2G-Enterprises*, ambas medidas foram realizadas no Laboratório de Paleomagnetismo (IAG/USP). Com os dados MRI obtêm-se a MRIS, a coercividade média ($B_{1/2}$), e o índice de dispersão (DP) que fornecem informações sobre a coercividade dos minerais magnéticos (Robertson e France, 1994). Para a análise da curva de aquisição da magnetização remanente isotérmica (MRI), foi utilizado o

método de curvas cumulativas gaussianas (Robertson e France, 1994; Kruiver *et al.*, 2001). Este método baseia-se no ajuste da curva de aquisição MRI versus o logaritmo do campo aplicado com: (i) a curva de aquisição numa escala linear, (ii) a curva de aquisição expressa como uma inclinação, e (iii) a curva de aquisição em uma escala de probabilidade. O número de componentes magnéticos necessários para um ajuste ideal para a aquisição é avaliada estatisticamente, e o método discrimina os minerais de acordo com sua coercividade (Robertson e France, 1994; Kruiver *et al.*, 2001). Com isso é possível determinar a coercividade do portador magnético dominante na amostra.

Através das curvas termomagnéticas obtém-se a temperatura de Curie/Néel, característica de cada fase magnética e também informações sobre as mudanças de estrutura cristalina e as reações químicas que afetam os minerais durante o aquecimento (e.g., Dunlop e Özdemir, 1997).

Para a realização das curvas termomagnéticas as amostras foram pulverizadas e aquecidas da temperatura ambiente até 700 °C e, em seguida, resfriadas até a temperatura ambiente. Para isto foi utilizado o KappaBridge KLY-4S e um forno CS3 (AGICO).

Resultados

A Fig. 2 mostra a variação da suscetibilidade magnética nos 14 metros da seção estudada. Observa-se claramente uma forte variação da suscetibilidade ao longo da seção. Esta variação se dá principalmente devido às mudanças na litologia. Uma litologia com maior teor de portadores magnéticos terá uma suscetibilidade magnética maior. A parte inferior do testemunho, entre 93.8 e 98.69 metros corresponde aos menores valores de suscetibilidade magnética por se tratar da Formação *Maiolica* formada de calcários brancos com baixíssima concentração de minerais magnéticos (Satolli *et al.*, 2008). Os valores mais elevados encontrados nesse trecho correspondem a intercalações de argila e margas (picos em 95.4 e 96.2 m). A parte superior representa a Formação *Marne a Fucoidi*, que é composta principalmente por calcários verde oliva e vermelho (com magnetização mais intensa, e conseqüentemente, maior suscetibilidade), além de calcários cinza claro a escuro, com variações de conteúdo de argila em calcários e margas, com frequentes intercalações de folhelhos negros (*black shales*). Durante os eventos de anoxia Selli e Noir (Erba *et al.*, 2010; Föllmi e Gainon, 2008) observa-se que a suscetibilidade magnética é baixa em decorrência da baixa concentração de material magnético nesses níveis ricos em matéria orgânica.

Curvas termomagnéticas obtidas para 3 amostras localizadas ao longo do testemunho, nas profundidades 88.36, 89.31, e 93.59 m mostram um comportamento irreversível, sendo praticamente constante durante o aquecimento e apresentando um crescimento abrupto em 580 °C durante o resfriamento, no ponto de Curie da magnetita. Este comportamento não se observa na amostra 93.08 m (Figura 2), onde novamente observa-se uma curva irreversível, porém com temperatura de Curie mais baixa, que pode estar associada à presença de impurezas na magnetita neoformada (Al, Ti) ou defeitos na rede cristalina (e.g., Dunlop e Özdemir, 1997).

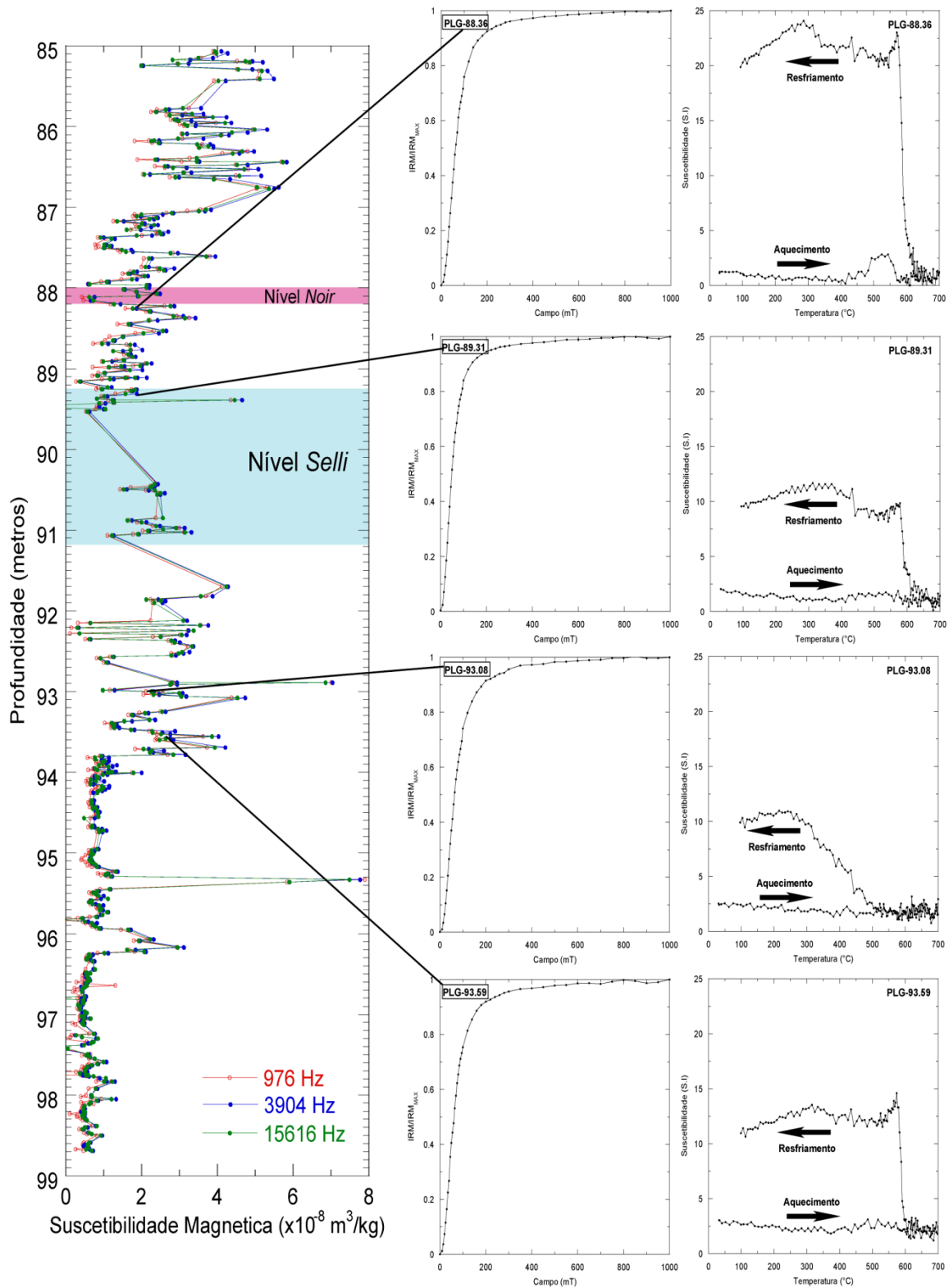


Figura 2: Variação da suscetibilidade magnética em três diferentes frequências, curvas de aquisição da magnetização remanente isotérmica (MRI) e curvas termomagnéticas para quatro amostras representativas ao longo do PLG Core.

Curvas de aquisição MRI para as mesmas 4 amostras utilizadas para a obtenção das curvas termomagnéticas apresentam comportamento muito semelhante. As curvas indicam uma predominância de minerais magnéticos de baixa coercividade (e.g., magnetita) porque saturam em um valor menor que 300 mT. Utilizando-se o método de (Robertson e France, 1994) em que mostra que as curvas de aquisição MRI podem ser descritas por uma curva do tipo Log-Gaussiana (CLG). Desse modo, é possível quantificar o percentual de cada componente magnética pela decomposição da curva entre diferentes curvas CLG, cada uma delas descritas por valores específicos de MRIS, $B_{1/2}$, e DP. Os parâmetros utilizados para o ajuste das curvas estão dispostos na Tabela 1. As curvas são ajustadas por no máximo duas componentes (Figura 3). A componente 1 que representa os minerais de baixa coercividade é a principal fase magnética encontrada, variando entre 91 e 97% da mineralogia magnética constituinte das amostras estudadas (Tabela 1). A segunda componente consiste de minerais de coercividade magnética mais alta, no entanto, a quantidade é inexpressiva (Tabela 1). A Fig. 3 mostra um exemplo com o ajuste das curvas IRM para a amostra 93.59 m utilizando o método de Robertson e France (1994) e tratados pelo programa desenvolvido por Kruiver *et al.*, (2001).

Conclusões

Neste trabalho apresentamos um estudo da mineralogia magnética do testemunho PLG Core, que compreende o período entre o Barremiano Superior e Aptiano Inferior da Bacia de Umbria-Marche, Itália. Como uma ferramenta para o estudo da variação do aporte de sedimentos durante eventos de alta temperatura (e.g., OEA1 – *Nível Sell*), uma vez que este período é de extrema importância do ponto de vista científico devido às grandes mudanças paleoclimáticas e paleogeográficas da Terra. Observa-se que a magnetita é o portador magnético predominante ao longo dos sedimentos coletados no testemunho. A mineralogia magnética, principalmente a suscetibilidade magnética, por sua forte variação ligada às variações litológicas, pode ser usada como uma ferramenta de correlação regional. Além disso, este estudo de mineralogia magnética é de fundamental importância para os trabalhos paleomagnéticos subsequentes.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Petrobras S.A. pelo apoio financeiro a esse trabalho, através das Redes Temáticas, e pela autorização em divulgá-lo.

Tabela 1: Tabela de análise de contribuição das coercividade dos minerais retirada do método de curvas cumulativas gaussianas (ver Kruiver *et al.* 2001).

Amostra	Componente	Contribuição (%)	MRIS (Am^2/kg)	$B_{1/2}$ (mT)	DP
PLG-88.36	1	91	1.57E-05	57.5	0.3
	2	9	1.61E-06	398.1	0.29
PLG-88.93	1	97	8.90E-06	57.5	0.32
	2	3	2.90E-07	691.8	0.32
PLG-89.31	1	92	1.00E-05	50.1	0.33
	2	8	8.90E-07	1819.7	0.38
PLG-93.08	1	93	1.20E-05	60.3	0.30
	2	7	9.00E-07	302.0	0.31
PLG-93.59	1	95	1.10E-05	60.3	0.32
	2	5	5.50E-07	631.0	0.30
PLG-95.17	1	92	3.60E-06	56.2	0.34
	2	8	3.00E-07	398.1	0.38
PLG-96.28	1	92	4.10E-06	61.7	0.34
	2	8	1.00E-07	645.7	0.39
PLG-98.21	1	97	3.45E-06	55.0	0.34
	2	3	1.00E-07	446.7	0.30

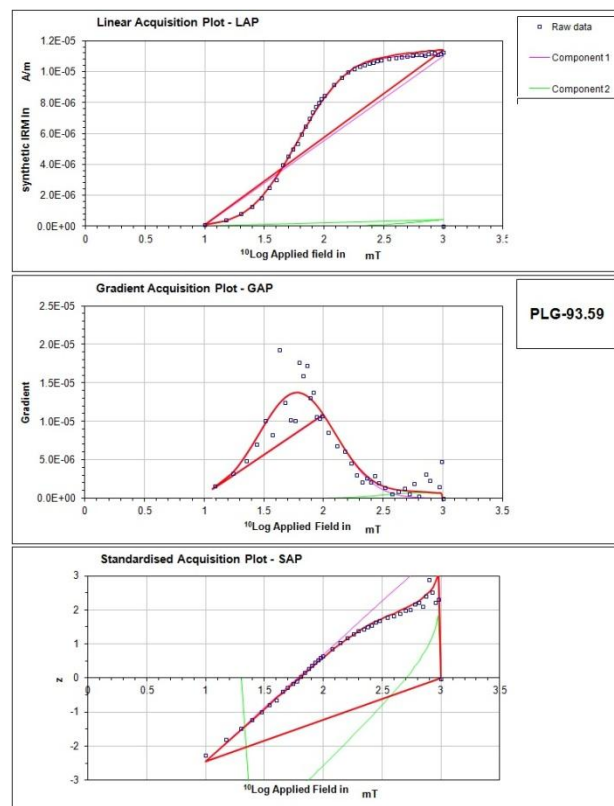


Figura 3: Um exemplo de curva de aquisição MRI, chamado de gráfico de aquisição linear (LAP), o gradiente da aquisição (GAP) e a componente de dispersão (DP), para a amostra PLG-93.59 m.

Referências

- Arthur, M. A., Jenkyns, H.C., Brumsack, H.-J., e Schlanger, S.O., 1990, Stratigraphy, geochemistry, and paleoceanography of organic-carbon-rich Cretaceous sequences: In: Ginsburg, R.N., e Beaudoin, B. (Eds.), *Cretaceous Resources, Events and Rhythms*. NATO ASI Ser. 304: Dordrecht, Netherlands (Kluwer Acad.), 75–119.
- Biggin, A. J., Steinberger, B., Aubert, J., Suttie, N., Holme, R., Torsvik, T. H., van der Meer, D. G. e van Hinsbergen, D. J. J., 2012, Possible links between long-term geomagnetic variations and whole-mantle convection processes: *Nature Geoscience*, 5, 526-533.
- Coccioni, R., Jovane, L., Bançalà, G., Bucci, C., Fauth, G., Frontalini, F., Janikian, L., Savian, J., Almeida, R. P., Mathias, G. L., e Trindade, R. I. F., 2012, Umbria-Marche Basin, Central Italy: A Reference Section for the Aptian-Albian Interval at Low Latitudes: *Scientific Drilling*, 13, 42-46.
- Dearing J. A., Dann R. J. L., Hay K., Lees J. A., Loveland P.J., Maher B. A. e O'Grady K., 1996, Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials: *Geophysical Journal International*, 124, 228-240.
- Dunlop, D. J. e Özdemir, Ö., 1997, *Rock Magnetism Fundamentals and frontiers*: Cambridge University Press.
- Emeis, K. C., e Weissert, H., 2009, Tethyan–Mediterranean organic carbon-rich sediments from Mesozoic black shales to sapropels: *Sedimentology*, 56, 247-266.
- Erba, E., Bottini, C., Weissert, H. J. e Keller, C. E., 2010, Calcareous Nannoplankton Response to Surface-Water Acidification Around Oceanic Anoxic Event 1a: *Science*, 329, 428-432.
- Föllmi, K. B., 2012, Early Cretaceous life, climate and anoxia: *Cretaceous Research*, 35, 230-257.
- Föllmi, K. B. e Gainon, F., 2008, Demise of the northern Tethyan Urganian carbonate platform and subsequent transition towards pelagic conditions: The sedimentary record of the Col de la Plaine Morte area, central Switzerland: *Sedimentary Geology*, 205, 142-159.
- Kruiver, P. P., Dekkers, M. J. e Heslop, D., 2001, Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetization: *Earth and Planetary Science Letters*, 189, 269-276.
- Liu, Q., Roberts, A.P., Larrasoaña, J.C., Banerjee, S.K., Guyodo, Y., Tauxe, L., e Oldfield, K., 2012, *Environmental Magnetism: Principles and Applications: Reviews of Geophysics*, 50, RG4002.
- Robertson, D. J., e France, D.E., 1994, Discrimination of remanence-carrying minerals in mixtures, using isothermal remanent magnetisation acquisition curves: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 82, 223-234.
- Satolli, S., Besse, J. e Calamita, F., 2008, Paleomagnetism of Aptian–Albian sections from the Northern Apennines (Italy): Implications for the 150–100 Ma apparent polar wander of Adria and Africa: *Earth and Planetary Science Letters*, 276, 115-128.
- Schlanger, S. O., e Jenkyns, H. C., 1976. Cretaceous oceanic anoxic events: Causes and consequences: *Geol. Mijnbouw*, 55, 179-184.
- Tejada, M. L. G., Suzuki, K., Kuroda, J., Coccioni, R., Mahoney, J. J., Ohkouchi, N., Sakamoto, T. e Tatsumi, Y., 2009. Ontong Java plateau eruption as a trigger for the early Aptian oceanic anoxic event: *Geology*, 37, 855-858.